

Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen Chancen für NRW

Studie

im Auftrag des

Ministeriums für Innovation, Wissenschaft, Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen
Völklinger Str. 49
40221 Düsseldorf

erstellt durch

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Werkstoff-Forschung, Köln
Dr. Christian Stiewe
Prof. Dr. Eckhard Müller
Tel: +49-2203-601-2662 e-mail: christian.stiewe@dlr.de

Inhalt

Rahmenbedingungen	3
Energiepolitische Rahmenbedingungen.....	3
Technologien zur Abwärmenutzung.....	4
Anwendungen der Thermoelektrik	7
Funktionsweise des thermoelektrischen Generators	11
Technologische Aspekte.....	16
Verfügbarkeit und Einsatzreife thermoelektrischer Materialien	16
Unternehmen im Bereich der thermoelektrischen Material- und Modultechnologie	23
Life Cycle Assessment.....	28
Stationäre Abwärmenutzung	30
Niedertemperaturbereich	31
Hochtemperaturbereich.....	34
Thermoelektrik in NRW	38
Chancen für die Thermoelektrik in NRW	41
Beispiele für mögliche Forschungsk Kooperationen	42
Roadmap	44
Zusammenfassung	44
Notwendige Aktivitäten zur Umsetzung	46
Literatur	48
Anhang.....	52
Liste der Kontakte.....	52
Steckbriefe Industrie.....	55
Steckbriefe Forschung	71
Steckbriefe Herstellung/Vertrieb	82

Rahmenbedingungen

Energiepolitische Rahmenbedingungen

Vor dem Hintergrund der Energiewende wird die Frage einer gesicherten Energieversorgung insbesondere auch unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit in der Zukunft eine zunehmende Rolle spielen. Dies gilt insbesondere, da die Strompreisentwicklung der vergangenen Jahre einen starken Aufwärtstrend aufweist, der absehbar weiterhin anhalten wird [1]. In Abbildung 1 wird dieser Trend mit einer Aufschlüsselung nach Kostenarten besonders für den Zeitraum 2000 bis 2013 deutlich.

Vor diesem Hintergrund ist die effizientere Nutzung von Abwärme speziell bei energieintensiven Prozessen von besonderem Interesse. Dies wird bereits durch unterschiedliche technische Ansätze (Kraft-Wärme-Kopplung, Organic Rankine Cycle, Kalina-Prozess u.a.) adressiert.

Diese Konzepte zielen speziell auf große Energieerzeuger und -verbraucher ab, bei denen noch immer ein großer Teil der eingesetzten Wärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird.

Die Nutzung vorhandener Wärmequellen ohne aufwändige Infrastruktur wurde bisher wenig thematisiert. Diese Art von Energienutzung wird z.T. durch das Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), beschrieben.

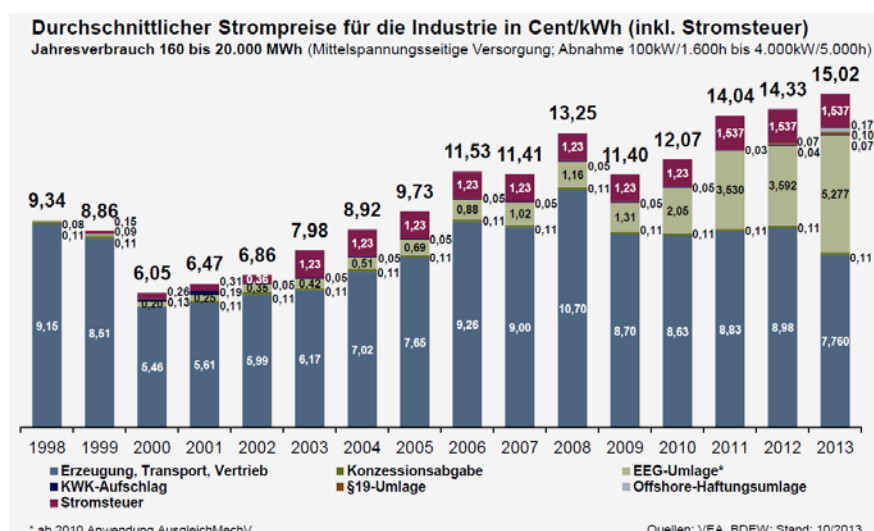


Abbildung 1: Jährliche Entwicklung der Stromkosten für die Industrie (Quelle: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., BDEW)

Der Primärenergieverbrauch in NRW hat in den letzten Jahren keinen signifikanten Trend aufgezeigt (Schwankungen von Jahr zu Jahr im Bereich von ca. 10%). Hauptverbraucher ist hierbei lt. Umweltamt Düsseldorf mit 51% Anteil am Endenergieverbrauch die Industrie und weitere gewerbliche Abnehmer (siehe Abbildung 2).

Berücksichtigt man, dass dabei ca. 2/3 der eingesetzten Primärenergie aus den unterschiedlichen Sektoren (Automotive, Industrie, Haushalte, ...) im ersten Umsetzungsprozess ungenutzt bleiben (siehe auch Abbildung 3), wird das immense Potential für die Abwärmenutzung deutlich. Allein für das verarbeitende Gewerbe in NRW wurden zwischen 2000 und 2010 zwischen 726 und 885 Petajoule¹ ($2,5 \cdot 10^5$ GWh) pro Jahr an Endenergieverbrauch angegeben.

In NRW fallen durch die Großindustrie (Glashütten, Stahlerzeugung, Aluminium- und Kunststoffverarbeitung, Keramik- und Papierherstellung u.a.), aber auch beim mittleren und Kleingewerbe sehr große Mengen an Abwärme an, die bisher mit dem Kühl- oder Abwasser bzw. durch die Abluft in die Atmosphäre abgegeben werden. Vielfältige Ansätze zur Nutzung dieser Abwärme gibt es bereits. Gerade in NRW bietet sich aufgrund des nach wie vor hohen Industrialisierungsgrades großes Potential für eine Vernetzung von Wärmeerzeugung und -nutzung.

Technologien zur Abwärmenutzung

Die Nutzbarkeit von Abwärme hängt immer auch davon ab, ob eine Erfassung der Wärme über den speziell ausgewählten Verwertungsprozess überhaupt technisch realisierbar ist, so dass sich angepasst an die verschiedenen spezifischen Randbedingungen von Fall zu Fall durchaus verschiedene Technologien der Sekundärenergienutzung als optimal erweisen können. So tritt bei vielen Energieprozessen die Abwärme in zu geringer Dichte oder bei zu geringer Temperatur aus, um sie einem Sekundärprozess zuzuführen. In Prozessen, in denen die Wärme in einem Medium mit geschlossenem Kreislauf geführt wird (z. B. in Form von Wasser oder Dampf), birgt die Übertragung der Wärme nur wenige Schwierigkeiten. Auch die Extraktion aus dem Abwasser ist mittlerweile Stand der Technik.

Eine wichtige Komponente bei der praktischen Nutzung der Wärme sind Wärmetauscher, die die Wärme von einem Medium auf ein anderes übertragen. Verbreitete Bauformen sind Luft/Luft, Luft/Wasser oder Wasser/Wasser, auch die Anpassung an weitere Fluide (z. B. Thermoöl) wurde realisiert. Finden der Anfall und die Nutzung der Abwärme nicht gleichzeitig statt, sind Speichersysteme erforderlich [2].

¹ Quelle: Statistisches Landesamt NRW IT.NRW

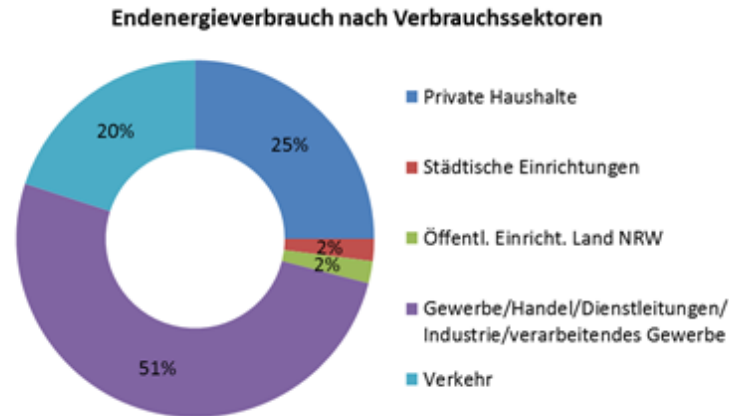


Abbildung 2: Endenergieverbrauch nach Verbrauchssektoren in NRW 2009 (Quelle: Umweltamt NRW)

Organic Rankine Cycle (ORC)

Der ORC ist ein thermodynamischer Kreislaufprozess mit einer organischen Flüssigkeit (oft Silikonöl oder Kohlenwasserstoffe) als Arbeitsmedium zum Antrieb einer Turbine mit Generator zur elektrischen Stromerzeugung. Bei Abwärme mit geringen Temperaturen ist der Einsatz von Wasser als Arbeitsmedium oft nicht sinnvoll und (organische) Flüssigkeiten mit niedrigeren Siedepunkten liefern bessere Wandlungseffizienz. Kommerzielle Anwendung findet der ORC z. B. in Biogasanlagen und Geothermie-Kraftwerken. Er wurde bereits in Nutzfahrzeugen erprobt und kommt auch für stationäre Abwärmenutzung in Betracht, um den Primärenergiebedarf industrieller Prozesse zu senken. Realisierte Anwendungen umfassen unter anderem Schmelzöfen und Abwärme aus der Glasverarbeitung. Übliche Quellentemperaturen liegen zwischen 150 und 350 °C. Kommerzielle ORC-Module weisen Leistungen zwischen 200 und 2500 kW_{el} (Biomassekraftwerke) bzw. zwischen 1 und 7,5 MW_{el} (Geothermie) auf [3]. ORC-Anlagen für niedrigere Primärtemperaturen als 150 °C oder höhere als 350 °C sind noch nicht am Markt verfügbar. Jede spezifische Anwendung erfordert dabei eine genaue Kostenbetrachtung hinsichtlich der notwendigen Investitionen. Die Technologie wurde in NRW z.B. von den Dt. Edelstrahlwerken erprobt, wird aber derzeit aufgrund der hohen notwendigen Investitionen von ca. 11 M€ für den Aufbau einer Demonstrationsanlage bei einer Amortisierungsdauer von 7 Jahren nicht weiter verfolgt.

Kalina-Prozess

1970 wurde vom russischen Ingenieur Kalina ein dem ORC-Prozess vergleichbares Verfahren vorgeschlagen, der „Kalina-Prozess“. Dieser verwendet ein Ammoniak/Wasser-Gemisch und soll theoretisch einen höheren Anlagenwirkungsgrad erreichen. Allein wegen des Arbeitsmediums NH₃ sind Kalina-Anlagen jedoch aufwendiger und damit teurer. Es ist zu vermuten, dass ORC-Anlagen aus diesem Grunde in Zukunft eine größere Verbreitung finden werden als

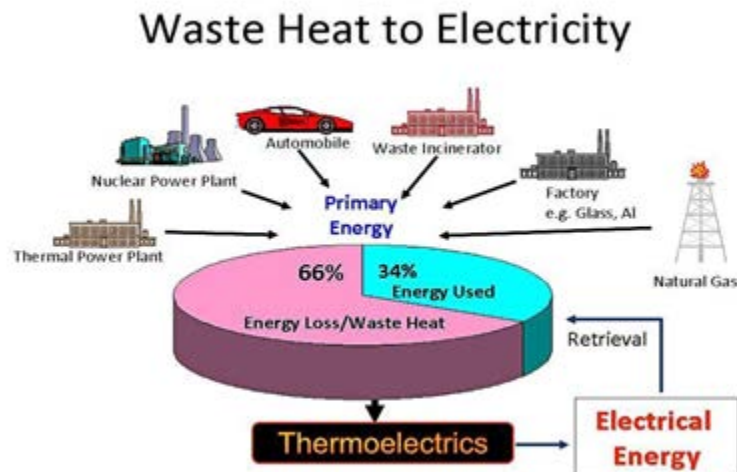


Abbildung 3: Verteilung der eingesetzten Primärenergie mit Potential zur Thermoelektrik-Nutzung

Kalina-Anlagen². Weltweit gibt es bisher nur wenige Anlagen, die in der Geothermie oder zur Verstromung industrieller Abwärme eingesetzt sind.

Stirling-Motor

Beim Stirling-Motor handelt es sich um eine Wärme-Kraftmaschine, bei der die Wärmezufuhr von außen erfolgt, das Arbeitsgas von der Umgebung abgeschlossen ist und nicht verbraucht wird. Über eine Temperaturdifferenz, die an den Seiten des Motors anliegt, wird das Arbeitsgas erwärmt und wieder abgekühlt. Im Zyklus lässt sich das Gas so expandieren und wieder verdichten. Damit kann über einen bewegten Kolben mechanische Arbeit abgenommen werden, die ggf. auch in elektrische Energie gewandelt werden kann. Es gibt keine kommerziellen Anlagen in Geothermie- oder Biomassekraftwerken. In der Demonstrationsphase befinden sich Stirling-Motoren zur Nutzung industrieller Abwärme.

Thermoelektrische Generatoren

Thermoelektrische Generatoren (TEG) sind in der Lage, über einen Festkörpereffekt Wärme ohne mechanische Bewegung direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Sie stellen damit eine Alternative zu elektrischen Maschinen nach dem Dynamoprinzip dar, auch insofern, als durch TEG Gleichstrom erzeugt wird. Ein TEG besteht aus Wärmetauschern an der Heiß- und Kaltseite, einem meist plattenförmigen thermoelektrischen Modul und ggf. einer DC/DC-Wandler-Elektronik zur Einspeisung der elektrischen Energie in eine Batterie oder ein externes Netz. Die über das Modul abfallende Temperaturdifferenz führt dazu, dass mit dem Wärmestrom ein elektrischer Strom durch das thermoelektrische Bauteil getrieben wird. Mit diesem Prinzip verbindet sich eine sehr kompakte Bauweise (plattenförmige Module von

² <http://waermepumpe.wordpress.com/2012/06/29/orc-technik-und-kalina-prozess-nutzung-von-niedertemperaturabwarme-zur-stromerzeugung/>

wenigen mm Dicke), Langlebigkeit, hohe Zuverlässigkeit ohne Wartungsbedarf, was insbesondere im dezentralen Einsatz oder an schwer zugänglichen Stellen in Großanlagen einen erheblichen Vorzug gegenüber etablierten Technologien wie z. B. ORC oder Stirling bietet. Im Raumfahrteinsatz haben TEG ihren jahrzehntelangen störungsfreien Betrieb unter Beweis gestellt. TEG sind weitaus unempfindlicher gegenüber diskontinuierlichen Primärwärmeströmen als herkömmliche Verfahren. Allerdings hat sich die Technologie aufgrund des bislang relativ geringen Wirkungsgrades kommerzieller thermoelektrischer Module nur in einigen Nischenanwendungen stabil etabliert.

Thermoelektrisch erzeugte elektrische Leistung ist aufgrund der noch zu hohen Investitionskosten für TEG (vor allem aufgrund des Fehlens etablierter Herstellungstechnologien) bislang gegenüber der konventionellen Stromversorgung wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Insbesondere sind wegen des niedrigen Wirkungsgrades thermoelektrische APUs (auxiliary power units – TEG-Hilfsstromquellen mit eigenständiger Brennstoffversorgung) in Standardsituationen nicht wirtschaftlich. Veränderte Bewertungsmaßstäbe liegen für die netzferne bzw. netzautarke Stromversorgung vor, in mobilen Systemen oder wenn Steuer-, Mess- bzw. Überwachungssysteme mit geringer Leistungsaufnahme dauerhaft mit extrem hoher Versorgungssicherheit betrieben werden sollen. Günstige ökonomische Randbedingungen bestehen auch bei Nutzung vorhandener Abwärmequellen, da hier kein technischer Aufwand für eine separate Wärmequelle erforderlich ist und die Primärwärme kostenfrei zur Verfügung steht. Insbesondere in stationären Energieanlagen mit kontinuierlichem Betrieb über sehr lange Zeiträume können TEG aufgrund des jahrzehntelangen wartungsfreien Betriebs thermoelektrischer Module rentabel eingesetzt werden.

Anwendungen der Thermoelektrik

Die Anwendungen der Thermoelektrik lassen sich wesentlich in drei Gebiete untergliedern:

- Generatorik
- Sensorik
- Temperierung

Im Bereich der **Thermogeneratorik** wird ein Wärmestrom durch ein thermoelektrisches Modul, der durch äußere Temperaturunterschiede hervorgerufen wird, anteilig in elektrische Energie umgewandelt. Dies erlaubt es, in wärmeintensiven Prozessen einen Teil der Abwärme zu rekuperieren [4]. Für die Sekundärenergienutzung wird die Bereitstellung von TEG-Modulen und damit der Bedarf an effektiven thermoelektrischen Materialien im Temperaturbereich von 300 K bis 1000 K immer bedeutsamer. So erwartet die Fahrzeugindustrie bei maximalen Temperaturen bis ca. 780 K eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs um ca. 5%, sofern es gelingt, aus der Abgaswärme eines Mittelklassefahrzeugs ca. 600–700 Watt elektrische Leistung bereitzustellen [5, 6]. Angesichts des stetig wach-

senden elektrischen Verbrauchs auch in modernen Flugzeugen in Kombination mit tendenziell steigenden Verbrennungstemperaturen und dem Auftreten von hohen Wärmeflüssen in Bauteilstrukturen am Triebwerk stellen TEG auch in der Luftfahrt einen vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung der Gesamt-Treibstoffeffizienz dar, welcher sich im Hinblick auf strengere Regelungen bzgl. des Schadstoffausstoßes als eine Schlüsseltechnologie erweisen könnte.

Zum Bereich der **Sensorik** zählt die Methode der Temperaturmessung mit Hilfe von Thermo-elemente, d.h. einer Kombination von jeweils zwei Metalllegierungen mit unterschiedlicher Thermokraft (auch als Seebeck-Koeffizient bezeichnet; ein Maß für die elektrische Spannung, die durch einen vorgegebenen Temperaturunterschied erzeugt wird), die in Gestalt von gewalzten kalibrierten Drähten zu einem elektrischen Messkreis verbunden werden. Ein Temperaturunterschied zwischen der einen Kontaktstelle dieser Drähte („Messstelle“) und der anderen („Referenzkontakt“) führt zu einer elektrischen Spannung und erlaubt bei Kenntnis der Temperatur an der Referenzstelle die genaue Messung der Kontaktstellen-temperatur. Solche Thermoelemente haben den großen Vorteil eines einfachen Aufbaus und einer sehr geringen thermischen Masse, die ein schnelles Ansprechen ermöglicht. Miniaturisierte Thermoelemente oder Thermoelement-Arrays aus Halbleitern oder Metallen werden auch als Thermosensoren für Wärmestrom, Wärmefluss, IR-Strahlung, spezifische Wärme, Durchfluss und viele weitere Messgrößen verwendet, die über thermische Effekte messbar sind.

Die **Temperierung** umfasst das Heizen und Kühlen z.B. von Detektoren oder optoelektronischen Bauteilen, deren Arbeitstemperatur möglichst konstant gehalten oder zeitlich definiert geführt werden muss, aber auch für medizinische Anwendungen, in Analysegeräten und im Freizeitbereich. Hierfür werden thermoelektrische Materialien eingesetzt, die neben einer hohen Thermokraft eine hohe elektrische Leitfähigkeit bei möglichst kleiner Wärmeleitfähigkeit aufweisen sollen. P- und n-halbleitende Materialien werden zu (in der einfachsten Bauform plattenförmigen) Modulen („Peltier-Module“) verarbeitet, deren Oberfläche in guten thermischen Kontakt zu dem zu temperierenden Objekt gebracht wird. Ein elektrischer Stromfluss durch das Modul bewirkt einen Wärmetransport und damit einen Wärmeein- oder -austrag am Objekt. So können z.B. die bildgebenden Bauteile in Infrarotkameras direkt in ihrer Temperatur stabilisiert werden ohne störende Vibrationen zu verursachen, wie sie z.B. bei kompressorgestützten Aggregaten auftreten würden. Auch für andere Anwendungen (z.B. in Camping-Kühlboxen) nutzt man diese Module, die bereits seit Jahrzehnten breit kommerzialisiert sind.

Die vorliegende Studie fokussiert auf das Anwendungsgebiet der Thermogeneratorik, insbesondere den Einsatz von TEG in stationären Systemen. Weltweit konzentrierten sich die Aktivitäten zur Abwärmenutzung durch Thermoelektrik seit ca. dem Jahr 2000 wesentlich auf automobiler Anwendungen. Da das Potential der thermoelektrischen Rekuperation für stationäre Anwendungen im Gegensatz zum Automobilbereich noch weitgehend

unspezifiziert ist, bedarf es hier einer genaueren Analyse möglicher Einsatzbedingungen für eine belastbare Potentialabschätzung. Klare Unterscheidungsmerkmale sind die oft wesentlich längeren Gesamt-Betriebsdauern, geringeren Einschränkungen hinsichtlich Gewicht und Bauraum, geringere Belastungen durch Vibration, oft langfristig stabile Betriebsbedingungen und die potentiell weit größere Systemdimension. Generell sind die Anforderungen an höchste Materialgüte (relevant für den Systemwirkungsgrad) geringer, im Vordergrund stehen die spezifischen Investitionskosten (€/W installierte elektrische Leistung) bzw. Amortisierungszeiten.

Andererseits sind die Randbedingungen für den TEG-Einsatz, die in stationären Anwendungen anzutreffen sind, extrem vielfältig, die entsprechend sehr verschiedener Einzelösungen bedürfen. Eine grundlegende Klassifizierung hinsichtlich wirtschaftlicher Randbedingungen ergibt sich aus dem Kriterium, ob die TE Stromerzeugung im konkreten Einsatzfall in direkter Konkurrenz zur zentralen Stromversorgung steht oder Aspekte der autarken Versorgung (netzferne/wechselnde Standorte oder lokale Versorgung an schwer zugänglichen Stellen in Großanlagen) eine Rolle spielen.

Abseits des Automobils sind neben verschiedenen Anwendungen von thermoelektrischen Generatoren im elektrischen Niederleistungsbereich (z.B. als Ladegeräte für Mobiltelefone im mW-Bereich) bislang nur punktuelle Anwendungen im Hochleistungsbereich bekannt.

Beispiele lassen sich in den USA finden, wo durch thermoelektrische Generatoren z.B. zum Betrieb von Wetterstationen (50 W elektrisch), zum kathodischen Schutz von Gas-Pipelines (220 W elektrisch) oder zur messtechnischen Überwachung von Pipelines (Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA), 5 kW elektrisch) verwendet werden [3]. Vergleichbare Systeme bietet auch GazProm in RU an. Diese Anwendungen nutzen die autarke Stromerzeugung durch TEG für netzferne Anwendungen. Die TEG-Module werden dabei meist über Gasbrenner beheizt, es handelt sich damit nicht um Abwärmenutzung.

In Japan laufen aktuelle Entwicklungen für eine Hochleistungsanwendung zur industriellen Abwärmenutzung. In einem Versuchsaufbau der japanischen Firma Komatsu werden heiße Abgase eines Zementierungssofens verwendet, um mit einem thermoelektrischen Generator 240 W elektrisch zur Verfügung zu stellen [7]. Ende 2013 [8] wurde von Komatsu eine Entwicklung zu einem modularen System für die Abwärmenutzung in der Stahlverarbeitung präsentiert, das in der Vollausslegung des Demonstrators ca. 10 kW_{el} liefern soll. Auch in DE wurden leistungsstarke Systeme demonstriert. In Halle (SA) wurde von der Fa. TEC COM GmbH ein System zur Verstromung von Deponieabgas aufgebaut, das eine elektrische Leistung von mehreren kW erreichte.

Hauptvorteil der thermoelektrischen Generatoren ist der einfache Aufbau der Module im Gegensatz zu etablierten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme, wie z. B. ORC, Dampfturbine usw. und der prinzipiell wartungsfreie Betrieb. Zudem eignen sich TEG besser als herkömmliche Verfahren zur Nutzung stark diskontinuierlicher Abwärmeströme.

Im Vergleich dazu erfordert die Abwärmenutzung beispielsweise mittels ORC einen erheblichen apparativen Aufbau und die Modifikation der Systeme, deren Abwärme genutzt werden soll. So berichten die Deutschen Edelstahlwerke, dass eine Analyse des ORC-Prozesses für ihre Anlagen einen Investitionsbedarf von ca. 11 M€ bei einer Amortisationsdauer von ca. 7 Jahren ergab. Die Kosten für ein thermoelektrisches System zur Abwärmenutzung konnten bislang nicht im Detail analysiert werden; sie sind ohne genaue Kenntnis der speziellen Systembedingungen nur mit großen Unschärfen abzuschätzen.

Funktionsweise des thermoelektrischen Generators

Ein thermoelektrisches Material hat die Eigenschaft, bei anliegender Temperaturdifferenz eine Potentialdifferenz zwischen der Heißseite und der Kaltseite auszubilden, die sich als elektrische Spannung abgreifen und nutzbar machen lässt. Die wesentliche Kenngröße, die die Eignung eines thermoelektrischen Materials für die Energiewandlung charakterisiert, ist die thermoelektrische Gütezahl ZT . Sie ist definiert als

$$ZT = Z(T) \cdot T = \frac{S^2 \sigma}{\lambda} T \quad (\text{Gl. 1})$$

mit dem Seebeck-Koeffizienten S , der elektrischen Leitfähigkeit σ und der Wärmeleitfähigkeit λ bei der Temperatur T . Die Gütezahl ZT ist eine Materialeigenschaft, die direkt mit der maximalen theoretischen Wandlungseffizienz η_{th} (= Wirkungsgrad; Verhältnis von erzeugter elektrischer Leistung P_{el} zum aufgewendeten Wärmestrom q) verknüpft ist. Es gilt bei einer Temperaturdifferenz zwischen T_1 und T_2 mit einer mittleren Gütezahl \overline{ZT} (vereinfacht):

$$\eta_{\text{th}} = \frac{W_{\text{el}}}{q} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \frac{\sqrt{1 + \overline{ZT}} - 1}{\sqrt{1 + \overline{ZT}} + \frac{T_1}{T_2}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, muss die angelegte Temperaturdifferenz ΔT möglichst groß sein (Carnot-Wirkungsgrad $\Delta T / T_2$), ebenso wie die Gütezahl ZT . Einen Überblick zu ZT -Werten etablierter thermoelektrischer Materialklassen gibt Abbildung 4.

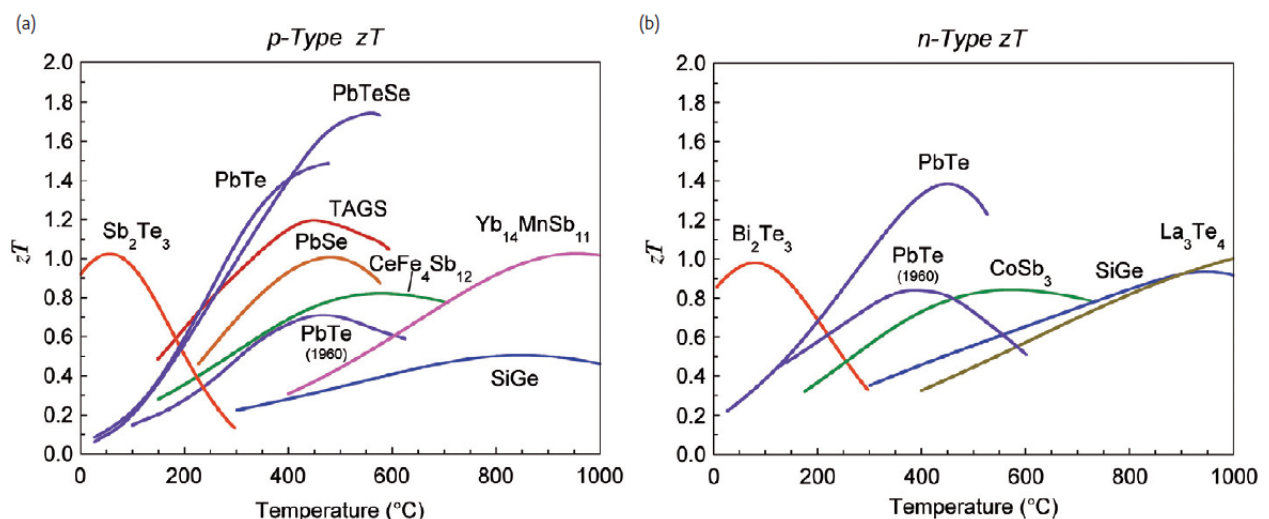


Abbildung 4: ZT -Werte von thermoelektrischen Halbleitermaterialien. (a): p-leitende Verbindungen, (b): n-leitende Verbindungen [9]

Nieder-Temperatur-TEG

Der aktuelle Stand der Technik wird im kommerziell etablierten Bereich fast ausschließlich durch Module aus Wismuttellurid geprägt. Dieses Material erzielt bei Temperaturen von ca. 100 °C ZT-Werte von maximal 1 für das n-Material und ca. 0.8 für das p-Material. Aus diesem Grund ist ein Einsatz ausschließlich für Anwendungen im Niedertemperaturbereich (< 250 °C) sinnvoll; zudem erlaubt auch die eingeschränkte thermische Stabilität von Bi_2Te_3 keinen Einsatz bei höheren Temperaturen. TEG-Peltier-Module auf Basis von Bi_2Te_3 werden kommerziell breit vertrieben. Mit speziellen TEG-Modulen werden maximale Wirkungsgrade bis zu 7.2 % und Leistungsdichten bis ca. 1 Wcm^{-2} erreicht [10]; handelsübliche Peltier-Module erreichen wegen der eingeschränkten Temperaturbelastbarkeit im TEG-Betrieb nur 3–4%.

Hoch-Temperatur-TEG

TE Module aus Bleitellurid-Materialien (dotiertes PbTe und $(\text{Pb},\text{Sn})\text{Te}$) werden praktisch seit Jahrzehnten in konfektionierten Komplettsystemen eingesetzt, sind jedoch als Einzelmodule kaum erhältlich. Sie finden bislang in recht geringem Umfang Anwendung, wobei die Einsatzfälle im Hinblick auf thermische Zyklierung und mechanische Beanspruchung oft weniger anspruchsvoll sind als im Automobil. So haben sich Module auf Basis von PbTe neben der Raumfahrtanwendung (Radioisotopengeneratoren für Satelliten und Lande-Sonden) für den kathodischen Korrosionsschutz von Pipelines bewährt³. Bei dieser Anwendung ist die Wandlungseffizienz nicht das entscheidende Kriterium, und die konstanten Betriebsbedingungen sowie ein in der Regel nicht limitierter Bauraum lassen einen vergleichsweise einfachen Generatöraufbau zu. PbTe als TE Material selbst konnte in den vergangenen Jahren massiv weiterentwickelt werden. So wurde unter Laborbedingungen für n-leitendes PbTe ein ZT-Wert von rund 1.4 bei einer Temperatur von 450 °C erreicht, während für das p-leitende Bleitellurid sogar bis zu 1.8 bei 550 °C berichtet wurde [9].

In den letzten Jahren wurden verstärkt neue Materialklassen für die HT-Wandlung gefunden, wobei eine wesentliche Orientierung durch das „Phonon glass, electron crystal“-Konzept von G. Slack vorgegeben wurde, nach dem ein thermoelektrisches bulk-Material zwar ein hervorragender Elektronenleiter sein soll, aber gleichzeitig wirkungsvoll die Phononen streuen muss (hohe elektrische Leitfähigkeit, geringe Wärmeleitfähigkeit). Nanoskalige und nanostrukturierte Materialien sind ein Ansatz, um dies zu erreichen (dünne Schichten, Multilayer-Systeme, gezielt entmischte Materialien [11, 12]). Hier liegt hohes Potential für die Anwendung, auch wenn diese Ansätze bis heute technisch noch nicht voll ausgereift sind, teils mangels Temperaturstabilität (Kornwachstum bzw. diffusive Homogenisierung bei höheren Temperaturen), teils mangels technischer Reproduzierbarkeit, so dass

³ <http://www.globalte.com>

homogene bulk-Materialien nach wie vor die praktisch bewährtesten Kandidaten für Hochtemperatur-Thermoelektrika sind. Übersichten hierzu geben u.a. [13] und [14].

Bereits sehr gut untersucht ist die Materialklasse der Skutterudite, abgeleitet von der Basisverbindung CoSb_3 . In dieser Materialklasse wurden für den mittleren Temperaturbereich bis 600 °C hervorragende thermoelektrische Eigenschaften entwickelt. Das Verständnis der Skutterudite hat in den letzten Jahren deutlich gewonnen [15, 16], wobei aus einem gewachsenen Grundlagenverständnis heraus Skutterudite mehr und mehr „maßgeschneidert“ werden können, u.a. durch gezielten Einbau von Gastatomen als Phononenstreucentren in die Hohlräume des Kristallgitters. Gute ZT-Werte wurden für n-leitende Skutterudite wie $(\text{Ba,Yb})_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ bzw. $(\text{Ca,Ba})(\text{Co,Ni})_4\text{Sb}_{12}$ berichtet (um 1.2 zwischen 500 °C und 600 °C [16-18]). P-leitende Skutterudite wie $\text{CeFe}_4\text{Sb}_{12}$ bleiben bislang dahinter zurück (um 0.8 bis 1 zwischen 500 °C und 600 °C [16, 19]). Vor kurzem konnte eine umfangreiche Studie zu mehrfach gefüllten Skutteruditen $(\text{Ba,Sr,DD,Yb})_x(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_4\text{Sb}_{12}$ für beide Polaritäten ZT-Werte > 1 nachweisen und gleichzeitig annähernd gleiche mechanische wie thermomechanische Eigenschaften von p- und n-Materialien einstellen [20]. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung thermozyklusfester HT-TEG-Module. Aufgrund der überragenden thermoelektrischen Eigenschaften, ihrer besseren mechanischen Handhabbarkeit und Verarbeitbarkeit sowie der weit besseren Materialverfügbarkeit haben Skutterudite für die technologische Entwicklung von HT-TEG-Modulen heute bereits eine höhere Wertigkeit gegenüber Bleitellurid erlangt; daneben spielen insbesondere silizidische Materialien (vor allem Mg_2Si und seine Mischkristalle, aber auch höhere Mangansilizide) und Halb-Heusler-Legierungen eine wachsende Rolle.

Langjährige Erfahrungen zum Aufbau Skutterudit-basierter TEG für die Raumfahrt besitzt das Jet Propulsion Laboratory (JPL) der NASA [17, 21], dessen Entwicklungen vor allem auf Radioisotopengeneratoren (RTG) als Stromquellen für Weltraumsonden abzielen. Das JPL konnte an p/n-Schenkelpaaren aus Skutteruditen in Kombination (Segmentierung) mit weiteren Hochtemperaturmaterialien im Labor Wirkungsgrade von rund 15% demonstrieren. Aufgrund der konstanten Betriebsbedingungen in der Raumfahrt sind die Anforderungen an die Wandlerysteme jedoch nicht unmittelbar mit jenen terrestrischer Anwendungen vergleichbar und daher nicht direkt übertragbar. Auch aus Kostengründen sind für den terrestrischen TEG-Einsatz separate technologische Lösungen zu entwickeln.

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass nicht nur das TE Material selbst für die Effizienz thermoelektrischer Wandler ausschlaggebend ist. Eine Reihe von technologischen Aspekten ist darüber hinaus zu berücksichtigen, um die „reinen“ Materialeigenschaften möglichst verlustfrei in der Anwendung zu realisieren, womit einer ausgereiften Modultechnologie (dabei insbesondere der Verbindungstechnik der thermoelektrischen Materialien mittels elektrisch und thermisch hochleitfähiger Kontaktierungen) und der spezifischen Systemintegration letztlich ähnlich große Bedeutung für den technischen Erfolg im System zukommen wie dem Material selbst.

Durch den prinzipiellen Aufbau thermoelektrischer Generatoren, welcher auf einer elektrischen Reihen- und thermischen Parallelschaltung der p- und n-leitenden Halbleiterelemente (Pellets) beruht, ist eine Vielzahl interner Grenzflächen bedingt (siehe Abbildung 5), die jeweils mit einem unerwünschten thermischen und elektrischen Widerstand verbunden sind. Für jede auftretende Materialkombination ist in einem aufwendigen separaten Entwicklungsprozess eine Einzellösung für eine haltbare und langfristig temperaturstabile Kontaktierung zu finden. Neben der rein thermoelektrischen Funktionsoptimierung sind hier insbesondere Fragen der Thermomechanik, Thermozyklrierbarkeit, der mechanischen Integrität bei Schock und Vibration und der chemischen Langzeitstabilität durch eine individuell angepasste Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) zu lösen. Die international noch zu geringe Fokussierung der F&E-Aktivitäten auf diese Problematik ist ein Hauptgrund, weshalb den seit Jahren ansprechenden Ergebnissen bei der Materialgüte neuer HT-Materialien noch keine adäquaten ausgereiften Modulentwicklungen gegenüber stehen.

Beispielgebend sind auch hier die Aktivitäten des JPL der NASA. Für den Einsatz in RTG wurden zur Realisierung von segmentierten TE-Materialverbunden, bestehend aus Bi_2Te_3 -Mischkristallen und Skutteruditen Entwicklungsschritte für die AVT bis hin zur Implementierung von prototypisch hergestellten Modulen in ein Gesamtsystem erfolgreich realisiert [22]. Gemeinsame Arbeiten des JPL und der Michigan State University zielen im vom US Department of Energy geförderten Programm „Energy Efficiency and Renewable Energy“ auf einen Einsatz der Technologie in einem fahrzeugtauglichen TEG [23].

Auch in China laufen intensive und fachlich hochstehende Aktivitäten, so am Shanghai Institute of Ceramics der Chinesischen Akademie (SIC CAS), wo langzeitstabile Kontaktverbindungen zwischen TE Material und elektrischer Brücke mit einer Einsatztemperatur bis 500 °C entwickelt werden konnten [24]. Auch in Österreich werden derzeit forcierte Anstrengungen unternommen, auf Skutterudit-Basis modular aufgebaute TEG für den Einsatz im Fahrzeug zu entwickeln [25].

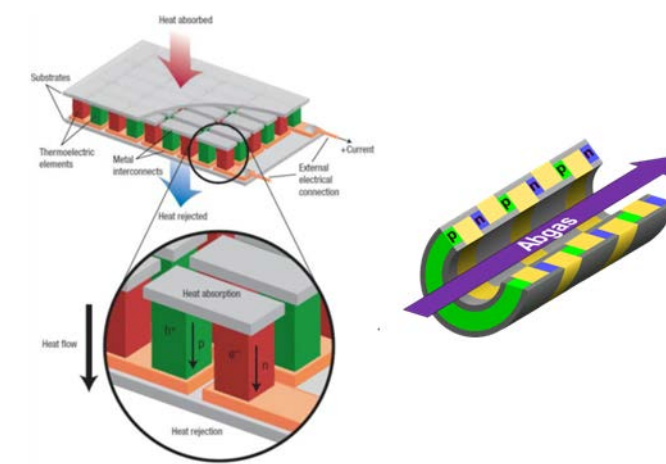


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators. Links: planare Ausführung [9], rechts: zylindrisch [26]

Im Hinblick auf ein effektives Gesamtsystem (Kosten, Gewicht, Leistungsdichte, Effizienz) sind Grenzflächeneigenschaften und mechanische Materialeigenschaften nicht nur im Modul selbst sondern auch in der unmittelbaren Systemumgebung des TEG optimal einzustellen, da sich die Leistungsfähigkeit der Wärmetauscher gleichermaßen durch geringe Übergangsverluste, die Stabilität von Verbunden und die Strukturintegrität von Bauteilkomponenten bestimmt. Der Erfolg der thermoelektrischen Energierückgewinnung (TER) hängt deshalb vor allem von zwei Fragestellungen ab: Wie gelingt die möglichst verlustfreie, stabile elektrische Kontaktierung der Materialien, und wie gewährleistet man einen maximalen Wärmefluss zwischen Wärmeträger (Abgas, Fluid, heißes bzw. kaltes Bauteil/Aggregat) und thermoelektrischem Material. Da jede Grenzfläche im Wärmestrompfad prinzipiell einen Temperaturabfall bedeutet, kann optimalerweise nur ein integriertes Generatordesign, in dem das thermoelektrische Modul möglichst direkt und verlustarm mit dem Wärmetauscher verbunden ist, zum Erfolg führen. Abseits des Niederleistungsbereichs (mW bis einige W) wurde ein solches integriertes Modulkonzept für TEG bislang weder im Automobil- noch im stationären Bereich breiter etabliert. Andererseits ist aus der Fahrzeugerprobung bekannt, dass durch das Abgas bei Volllast zu hohe Heißeitemperaturen am TEG eingebracht werden, die eine Zerstörung zur Folge haben können. Über einen Bypass in der Abgasführung kann der Zustrom zum Schutz der Rekuperationsaggregate abgeregelt werden. In jedem Fall bedarf es einer systemübergreifenden Betrachtung der Auswirkungen des Einsatzes von TEG für die komplette Bandbreite möglicher Betriebszustände, um verlässliche Aussagen zur Eignung bzw. zum Potential der TER treffen zu können.

International werden die grundlagenorientierte Optimierung der TE Materialeigenschaften und die Suche nach neuen Materialklassen anhaltend stark voran getrieben. Mit der Ausrichtung auf die Automobilanwendung treten daneben systemorientierte Arbeiten, Entwicklungen zu Verbindungslösungen und weiteren Begleittechnologien stärker in den Blickpunkt. Informationen zu technologisch umsetzbaren Lösungen an Schlüsselstellen bspw. für spezifische Verbindungstechniken werden naturgemäß nur selten in der Fachliteratur kommuniziert, werden in jüngster Vergangenheit jedoch vermehrt im Zuge der Präsentation von erfolgreichen Modulrealisierungen für den Hochtemperaturbereich sichtbar [27, 28]. Ebenso verfolgen immer mehr Arbeiten der Forschungsinstitutionen, Automobilhersteller und ihrer Zulieferer Fragestellungen zur Wirtschaftlichkeit der TEG und berichten in diesem Zusammenhang über die Aufskalierung von Fertigungsabläufen [29-31] und die Prüfung von Ausgangsmaterialien technologischer Qualität zur Substitution teurer hochreiner Ausgangsstoffe [19, 31-35].

Technologische Aspekte

Verfügbarkeit und Einsatzreife thermoelektrischer Materialien

Eine Bedingung für die Umsetzung thermoelektrischer Technologien in der breiten Anwendung ist die Verfügbarkeit thermoelektrischer Materialien mit sehr guten Funktionseigenschaften sowie die Beherrschung von Verfahren zur industriellen Produktion von TEG aus diesen Materialien. Für Niedertemperaturanwendungen bis ca. 250 °C sind Hersteller sowohl für Wismuttellurid-Materialien als auch für entsprechende Generatormodule bekannt. In den letzten Jahren berichten zahlreiche wissenschaftliche Publikationen von neuen thermoelektrischen Materialklassen für höhere Anwendungstemperaturbereiche mit deutlichen Verbesserungen der TE Funktionseigenschaften. Dabei handelt es sich häufig um Materialien, die zunächst nur im Labormaßstab in Mengen von wenigen Gramm hergestellt werden können. Teilweise werden hoch reine oder seltene Elemente verwendet, die dem engen Kostenrahmen nicht entsprechen, den die industrielle Anwendung setzt. Um eine tragfähige Basis für den massenhaften Einsatz thermoelektrischer Produkte zu schaffen, ist die Konzentration der Materialentwicklung auf kostengünstige, breit verfügbare und gesundheitlich sowie ökologisch unbedenkliche TE Materialien voranzutreiben. Hier sind die Materialklassen der Silicide ($\text{Mg}_2\text{Sn}_x\text{Si}_{1-x}$, Höhere Mangansilicide (HMS) und FeSi_2) von besonderem Interesse, da die Ausgangselemente preiswert und für die Umwelt unbedenklich sind. Dies gilt weitgehend auch für die Materialien ZnSb, ZnO und die Tetrahedrite (s.u.). Andererseits bleiben diese Materialien mit ZT-Werten von 0,5–1 [36] in ihrer Leistungsfähigkeit etwas hinter den besten bekannten TE Hochleistungsmaterialien zurück. Hier müssen Kostenabschätzungen zeigen, ob dies bei niedrigen Modulkosten zu akzeptablen Amortisierungszeiten im Dauereinsatz führt. „Niedrig-Preis-Module“ auf Basis dieser Materialien könnten speziell für großflächige Anwendungen von besonderem Interesse sein.

Ebenso sind Entwicklungen zur Aufskalierung thermoelektrischer Materialfabrikation für die Vorbereitung der Technologieüberführung in die industrielle Serienproduktion von besonderer Bedeutung.

Thermoelektrische Materialien sind häufig aus zahlreichen verschiedenen chemischen Elementen zusammengesetzt. Letztlich ist fast jedes stabile Element des Periodensystems, das feste Verbindungen bildet, in einem der bekannten thermoelektrischen Materialien anzutreffen. Eine Übersicht über die Verfügbarkeit und die Kosten all dieser Elemente ist im Rahmen dieser Studie nicht realisierbar und sinnvoll. Viele Elemente werden den TE Materialien nur in sehr geringen Mengen als Dotierstoffe zugesetzt; hier sind sowohl die globale Verfügbarkeit als auch der Anteil an den gesamten Materialkosten von untergeordneter Bedeutung.

In Tabelle 1 sind die physikalischen Eigenschaften der wichtigsten Elemente, die für TE Materialien verwendet werden, dargestellt. Darüber hinaus sind blau unterlegt Daten zu Rohstoffpreisen, Produktionsmengen und Ressourcen angegeben, entnommen aus dem US Geological Survey (USGS 2012) [37].

Es sind unterschiedliche Herstellungsmethoden bekannt, um aus den Ausgangselementen die TE Materialklassen zu synthetisieren. Das entsprechende Material muss in der erforderlichen Menge (in der Einführungsphase einige Tonnen pro Jahr) zu einem vertretbaren Preis lieferbar sein. Für die Entwicklung von Hochtemperatur-Generatoren bedarf es darüber hinaus der Technologien zur Verarbeitung und Kontaktierung, um Module und Generatoren produzieren zu können.

Hauptbestandteile

Eigenschaft	Te	Bi	Pb	Sb	Co	Sn	Mg	Mn	Ge	Zn	Se	Ba	Si
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	3	8	35.3	24.4	100	66.8	156	7.81	60.2	116	0.519	18.4	150
Spezifisch. elektr. Widerstand [$\text{n}\Omega\cdot\text{m}$]	100000	130	208	417	62.4	115	43.9	1.44	500000	59	10	332	1000000
Wärmekapazität [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	no data	no data	26.65	25.23	24.81	27.112	24.869	26.32	23.222	25.47	25.363	28.07	19.6
Dichte [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	6.24	9.8	11.34	6.697	8.9	7.365	1.73	7.21	5.323	7.14	4.39	3.51	2.34
Schmelzpunkt [K]	722.51	544	600.61	903.78	1768	505.08	923	1529	1211.4	692.68	494	1000	1683
Siedepunkt [K]	1263	1833	2022	1860	3200	2875	1363	2334	3106	1180	958	2170	3533
E-Modul [GPa]	46	32	16	55	209	50	45	198	no data	108	10	13	47
Schermodul [GPa]	16	12	5.6	20	75	18	17	no data	no data	43	3.7	4.9	no data
Kompressionsmodul [GPa]	65	31	46	42	180	58	45	120	no data	70	8.3	9.6	100
Poisson-Zahl [ν]	no data	0.33	0.44	no data	0.31	0.36	0.29	no data	no data	0.25	0.33	no data	no data
Härte [MPa]	180	94	38.3	294	1043	51	260	196	6	412	736	1.25	no data
Therm. Ausdehnung [$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	no data	13.4	28.9	11	13	22	24.8	21.7	6	30.2	37	20.6	2.6
Preis, 2011 [\$ /kg]	360	23	2.2 - 2.6	13.7	32	23 - 33	3.3 - 4.7	0.009 (ore)	1650	2	130	0.06	3
Produktion 2011 (USGS) [1000 t]	0.115	8.5	4.5	169	98	253	0.78	14	118	12.4	2	7.8	8
Weltw. Reserven (USGS) [1000 t]	24	320	85	1800	7500	4800	groß	630	>450	250	93	240	groß

Additive

Eigenschaft	Ni	Ag	In	Hf	Y
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	90.9	429	81.8	23	17.2
Spezifisch. elektr. Widerstand [$\text{n}\Omega\cdot\text{m}$]	69.3	15.87	83.7	321	596
Wärmekapazität [$\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	26.07	25.35	26.74	24.92	26.53
Dichte [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	8.908	10.49	7.31	13.28	4.472
Schmelzpunkt [K]	1728	1234.93	429.75	2506	1799
Siedepunkt [K]	3186	2435	2345	4876	3609
E-Modul [GPa]	200	83	11	78	63.5
Schermodul [GPa]	76	30	no data	30	25.6
Kompressionsmodul [GPa]	180	100	no data	110	41.2
Poisson-Zahl [ν]	0.31	0.37	no data	0.37	0.243
Härte [MPa]	638	251	8.83	1760	589
Therm. Ausdehnung [$\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	13.4	18.9	32.1	5.9	10.6
Preis, 2011 [\$ /kg]	22.8	1230	700	562	160-190
Produktion 2011 (USGS) [1000 t]	1800	23.8	0.609	no data	8.9
Weltw. Reserven (USGS) [1000 t]	80000	530	no data	no data	540

Seltene Erden

La	Ce	Nd	Eu	Yb
13.4	11.3	16.5	13.9	38.5
615	828	643	0.9	0.25
27.11	26.94	27.45	27.66	26.74
6.162	6.77	7.01	5.264	6.9
1193	1068	1297	1099	1097
3737	3716	3347	1802	1469
36.6	33.6	41.4	18.2	23.9
14.3	13.5	16.3	7.9	9.9
27.9	21.5	31.8	8.3	30.9
0.28	0.24	0.281	0.152	0.207
491	270	343	167	206
12.1	6.3	9.6	35	26.3
7000*	1700*	2300*	100000*	14000*
Rare earth oxides: 130				
Rare earth oxides: 110000				

Tabelle 1: Physikalische Stoffdaten und ökonomische Kennzahlen der wichtigsten Elemente für die Herstellung thermoelektrischer Materialien. Blau unterlegte Daten entstammen dem US Geological Survey 2012. Seltene Erden werden an den Rohstoffmärkten nicht direkt gehandelt. Die mit * markierten Preise sind Verkaufspreise von Laborlieferanten (Goodfellow, Alfa Aesar) für Reinheiten von 99,9% bei Abnahmemengen unter 1 kg und daher nicht direkt mit den Rohstoffpreisen der übrigen Elemente vergleichbar.

Der Vergleich der chemischen Elemente hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit zeigt nur bei wenigen chemischen Elementen eine kritische Situation. Hier ist in erster Linie Tellur zu nennen. Für den Einsatz von Te für thermoelektrische Generatoren sind wegen der begrenzten Fördermenge und Ressourcen und konkurrierender Technologien (hocheffiziente CdTe-Solarzellen) massive Preisschwankungen möglich; für eine Masseneinsatz sind die

bekannten Vorkommen nicht ausreichend. Germanium, Silber und Hafnium sind aufgrund ihres hohen Preises als kritisch anzusehen. Bei allen Elementen muss es zudem die Bestrebung sein, Material möglichst niedriger Reinheit für den Einsatz zu qualifizieren, um die Aufbereitungskosten zu minimieren.

Als Prozesstechnologie zur Herstellung von TE Materialien für den Hochtemperaturbereich sind die im Labor standardmäßig verwendeten Ampullenprozesse wegen ihres zu geringen Durchsatzes nicht gut geeignet (wenn auch Komatsu Electronics in Japan seit langem seine Wismuttellurid-Produktion im Zonenschmelzverfahren in speziellen 50-kg-Ampullen durchführt). Das größte Potenzial zur Aufskalierung der Materialproduktionsmenge wird derzeit der Gasverdüsung und dem Melt Spinning zugemessen, auch Wannengießverfahren haben sich bewährt. Diese Prozesse ermöglichen in Verbindung mit Sinterprozessen eine Produktion mit wenigen Prozessschritten und ggf. einen Verzicht auf lange Temperaturbehandlung. Auch nasschemische Prozesse sind für die großindustrielle Pulverproduktion hoch attraktiv. Sie sind jedoch bis heute nur für einzelne TE Materialien entwickelt worden und bei diesen erst für geringe Mengen erfolgreich demonstriert worden. Haupthindernis ist bisher eine nicht rückstandslose Entfernung von Lösungsmitteln, wodurch die elektrische Leitfähigkeit des Endprodukts verschlechtert wird. Eine Alternative stellt die Festkörpersynthese dar, bei der die Ausgangselemente durch Mahlen fein verteilt miteinander vermischt werden und in einem nachfolgenden Tempersschritt bei Temperaturen unterhalb der Schmelztemperatur die gewünschte Materialphase dargestellt wird. Bemerkenswerterweise wurde vor kurzem sogar ein natürlich vorkommendes Mineral mit einer relativ guten TE Gütezahl entdeckt (Kupfer-Antimon-Sulfid, „Tetrahedrit“), das nach einfachem Aufmahlen und Kompaktieren zu TE Schenkeln verarbeitet werden kann [38]. Seine effiziente Verwendung für die Thermogeneratorik ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

Höchsttemperaturmaterialien wie Silizium und SiGe, Clathrate, Oxide, Zintl-Phasen u.a. erreichen ihre maximale Effizienz erst im Bereich 600–1000 °C. Damit ist ihr Einsatz auf wenige Anwendungen beschränkt und die Aufbau- und Verbindungstechnologie ist nochmals komplizierter als im Hochtemperaturbereich bis ca. 500 °C, in dem das Hauptvolumen nutzbarer Abwärme in stationären Prozessen ansteht. Seit wenigen Jahren wird auch elementares Silizium für die bulk-Thermoelektrik ernsthafter in Betracht gezogen, seitdem nachgewiesen wurde, dass sich durch Nanostrukturierung die hohe Wärmeleitfähigkeit des kristallinen Si massiv reduzieren lässt. Wegweisende Arbeiten der Uni Duisburg-Essen (CENIDE) haben mit Si-Nano-Pulvern aus einem Reaktorprozess Gütewerte um $ZT = 0,5$ demonstriert [39], die für die Anwendung interessant sind, wenn sie mit niedrigen Prozesskosten erreicht werden können.

Zintl-Phasen sind zumeist Höchsttemperaturmaterialien. Es gibt jedoch erste Ansätze, diese hin zu verringerten Einsatztemperaturen zu entwickeln. Die bekannten Arbeiten bewegen sich bisher ausschließlich im Grundlagenbereich, so dass ein praktischer Einsatz mit kurzem Zeithorizont unwahrscheinlich ist.

Silizide bieten aufgrund vorhandener Technologien und günstiger Materialien eine sehr interessante Option. Umfangreiche Untersuchungen an Al-, Co- und Mn-dotiertem Eisen-silizid haben seine hohe Stabilität und einfache technologische Handhabbarkeit belegt; das Material ist preiswert, unbedenklich und praktisch unbegrenzt verfügbar. Dem steht eine recht niedrige thermoelektrische Güte (ca. 0,25) gegenüber. Mit den höheren Mangansiliziden (HMS) wurden etwas bessere TE Eigenschaften erreicht (bis 0,7) [40], jedoch gibt es noch ungeklärte Fragen zur Langzeitstabilität.

Zinkantimonid (Zn_4Sb_3) bietet gute TE Eigenschaften im relevanten Temperaturbereich und günstige Rohstoffkosten. Dieses Material ist bislang nur p-leitend verfügbar. Darüber hinaus stellen Degradationsprozesse bisher ein praktisches Problem dar, die die Funktionsstabilität einschränken. Das DLR hat in den vergangenen Jahren wesentliche Ergebnisse zur Aufklärung und Unterdrückung dieser Prozesse erreicht. Nur wenig geringer ist die TE Güte der wesentlich stabileren Verbindung ZnSb (0,8–1,0) [36], die aber noch wenig erforscht ist.

Da die Zn-Sb-Verbindungen bislang lediglich als p-Leiter synthetisiert werden konnten, stellt eine Kombination mit Mg_2Si -Mischkristallen als n-Leiter eine aussichtsreiche Option für den Modulbau dar. Diese weisen bei ZT-Werten um 1 [41] einen ähnlichen Temperaturverlauf ihrer thermoelektrischen Güte auf wie die Zn-Sb-Materialien. Vor allem die geringen Kosten der Ausgangselemente machen viele Silicide zu attraktiven Kandidaten für den Einsatz in TEGs.

Neben Magnesiumsilizid fallen unter diese Materialklasse auch Mischkristalle, bei denen das Silizium teilweise durch andere Elemente ersetzt wird. Bereits weitreichend untersucht wurde $\text{Mg}_2(\text{Si},\text{Sn})$. Die maximale Gütezahl von reinem Magnesiumsilizid beträgt nur etwa 0,5. Durch Zugabe weiterer Elemente wurden (z. B. für $\text{Mg}_2\text{Si}_{0,385}\text{Sn}_{0,6}\text{Sb}_{0,015}$) maximale ZT-Werte bis 1,1 nahe 800 K erreicht [42]. Ein Problem stellt die Oxidation des Materials dar: An Luft oxidiert das Material bei über 723 K zu Magnesiumoxid und elementarem Silizium. Durch Beschichtung des Magnesiumsilizids mit $\beta\text{-FeSi}_2$ kann dies unterdrückt werden [43].

Von allen bekannten thermoelektrischen Materialien wird den Skutteruditen und den Halb-Heusler-Verbindungen heute allgemein das größte Potenzial für die zeitnahe Serieneinführung der TEG eingeräumt. Diese Materialien erreichen sehr gute thermoelektrische Funktionseigenschaften im relevanten Temperaturbereich und können stabil und reproduzierbar hergestellt werden. Diese Einschätzung ist stark geprägt durch die vorherrschende Konzentration auf die Automobilanwendung und damit verbunden auf eine unverzichtbar hohe Güte der Materialien, ggf. unter Inkaufnahme höherer Materialkosten.

Skutterudite wurden in einer Veröffentlichung der AVL List GmbH, Österreich in Zusammenarbeit mit der Universität Wien und der Technischen Universität Wien [25] als zukunftssträchtige Materialien für Automobilanwendungen vorgestellt. Skutterudite weisen ansprechende thermoelektrische Funktionseigenschaften auf. Gleichzeitig wird auf Kosteneinsparungen durch Verwendung von Ausgangsmaterialien geringerer Reinheit hingearbeitet. Konzepte für

die thermische Ankopplung des TEG im Abgasstrang und die Verklammerung der TEG-Module wurden vorgestellt und durch Simulationen (CFD, FEA) und Prüfstandtests validiert. Eine prognostische Kostenabschätzung kam zu dem Schluss, dass für einen Massenmarkt Systemkosten von 2 bis 4 €/W realistisch sind.

Bei beiden Materialien sind aktuell die Rohstoffkosten noch hoch. Dies liegt bei den Skutteruditen in erster Linie an der erforderlichen hohen Reinheit der Ausgangsmaterialien. Arbeiten zur Verwendung weniger reinen Materials wurden in den vergangenen Jahren auch beim DLR verstärkt betrieben. Ausgehend von den Rohstoffpreisen und unter Berücksichtigung möglicher Kostenminderungen und Rabatte bei Verarbeitung größerer Mengen ist hier mit einer Reduktion der Materialkosten zu rechnen. Bei den Halb-Heusler-Verbindungen ist vor allem Hafnium ein Kostenfaktor. Es laufen Untersuchungen zur Reduktion des Hf-Anteils [44].

Für beide Materialklassen sind prinzipiell skalierbare Produktionsmethoden bekannt bzw. befinden sich bereits in der Erprobung. Darüber hinaus formieren sich erste Unternehmen, die eine Lieferung dieser Materialien in großen Mengen für TE Anwendungen umsetzen wollen. Kontaktierungstechnologien für beide Materialklassen sind in der Entwicklung, erste Erfolge sind sichtbar.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über wichtige thermoelektrische Materialklassen und deren technologisch relevante Eigenschaften.

In Europa bietet als erster kommerzieller Lieferant die österreichische Fa. Treibacher Skutteruditmaterial im kg-Maßstab an. Dabei werden sowohl für das n- als auch das p-Typ-Material ZT -Werte deutlich über 1 angegeben. Das Material wird in Pulverform bereitgestellt, so dass zum Aufbau von TE Modulen ein Kompaktierungsschritt anzuschließen ist. Die Kosten dieses Produkts sind jedoch noch hoch.

Alternativ verfolgt die norwegische Fa. TEGma A.S., eine Ausgründung des Technologiekonzerns ScaTec, das Ziel, Produktion und Vertrieb preiswerter metallisierter Skutterudit-Einzelschenkel zu etablieren. Beabsichtigt ist auch die Gründung eines deutschen Tochterunternehmens (TEGma GmbH). TEGma plant, die Ergebnisse eines Forschungsprojektes des DLR Köln, das sich Technologieschritten für einen massentauglichen Produktionsprozess – Materialherstellung, Kompaktierung, Beschichtung und Vereinzelung – widmet, in den Markt zu transferieren. Hierbei liegt ein besonderer Fokus auf der Effizienz-Kosten-Balance. Eine Beispiel-Kostenabschätzung auf Basis numerischer Simulationsrechnungen betrachtet einen typischen TEG mit einer theoretischen Leistungsabgabe von ca. 20 W, der ca. 60 g TE Material enthält. Mit verfügbaren erprobten Rohmaterialien ergibt sich dafür ein Materialpreis von 0,57 €/W in der Laborherstellung. Da im Projekt die chemische Zusammensetzung des Materials noch mit dem Ziel der ZT -Optimierung variiert wird, werden noch relativ geringe Materialmengen umgesetzt; eine Kostenreduzierung bei höherem Materialumsatz ist zu erwarten. Der aktuellen Abschätzung liegen Preise für Cobalt und Antimon von 280

bzw. 150 €/kg zugrunde⁴, während die internationalen Rohstoffpreise bei ca. 23,- bzw. 10,- €/kg liegen (Tabelle 1; Verarbeitung von Großmengen).

Eine Kostenabschätzung der Fa. Bosch zum Einsatz von TEG im Automobil ergab für große Stückzahlen Kosten von 0,60 €/W für das TE Modul [45]. gleichzeitig wurde auf die noch eingeschränkte Materialverfügbarkeit und -güte hingewiesen. Letztere ist für den stationären Einsatz weniger ausschlaggebend, da Gewicht und Bauraum des TEG hier eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Materialverfügbarkeit in industrierelevanten Mengen ist jedoch ein entscheidendes Kriterium. Es wird erwartet, dass aus der Vermarktung der Ergebnisse des aktuellen DLR-Projekts thermoelektrisches Hochtemperaturmaterial in erforderlicher Menge zur Verfügung stehen wird. Die Verfügbarkeit ist insbesondere für die Industrie ein wichtiges Entscheidungskriterium für das Engagement in der TEG-Technologieentwicklung.

⁴ Materialien der Reinheit 3N+

Materialklasse	Bi ₂ Te ₃	Bi-Sb	PbTe / LAST	TAGS	Skutterudite	Zintl-Phasen	FeSi ₂	Mg ₂ Si	HfSi	Zn ₄ Sb ₃	Halb-Heusler	Silizium / SiGe	Clathrate	Oxide
Temperaturbereich	< 500 K	< 300 K	300 - 800 K	500 - 900 K	300 - 900 K	500 - 1100 K	500 - 1200 K	300 - 900 K	300 - 900 K	250 - 670 K	300 - 1000 K	600 - 1300 K	> 600 K	> 800 K
Maximales ZT p/n	1,4 / 1,0	~0,3	1,8 / 1,3	1,5	1,0 / 1,7	~1,0	0,2 / 0,4	0,5 - 1,1	0,6 - 0,8	1,0 (nur p)	0,8	0,1 - 0,7	0,6 / 1,4	0,2 - 1,0
bei Temperatur (ca.)	430 K	200 K	750 K	750 K	750 K	> 700 K	900 K	800 K	800 K	650 K	700 - 1000 K	800 - 1300 K	800 - 1000 K	1000 K
Thermische Stabilität	bis 250 °C	keine Information	Kapselung nötig	instabil	OK, Oxidations-schutz nötig	instabil	ja	unklar, Oxidations-schutz nötig	instabil	Instabil an Luft, Degradation	OK	OK	OK	OK
Kontaktierung entwickelt	OK	OK	OK	OK	in Entwicklung	nein	in Entwicklung	OK	nein	OK	OK, Details unbekannt	OK	nicht bekannt	in Entwicklung
Indust. Produktionstechnologie	Ampullen	keine Information	Ampullen, Verdüsung	kein skalierbarer bekannt	Melt-Spinning, Verdüsung	Ampullen, Kugelmahlen	Lichtbogen-schmelzen, Kugelmahlen	kein skalierbarer bekannt	Melt-Spinning, Kugelmahlen	Melt-Spinning	Melt-Spinning, Lichtbogen-schmelzen	kein skalierbarer bekannt	Spinning, Lichtbogen-schmelzen	skalierbarer bekannt
Rohstoffpreis (\$/kg)*	190	20	60 - 200	variiert stark	16 + x	stark abh. von Yb-Gehalt	3	4 - 20	4 + x	10	25 - 250	3 (Si) 150 - 420 (SiGe)	1000	ab 30
Mögl. Lieferant	diverse	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	Tegma	nicht bekannt	NIST	Romny, Komatsu	nicht bekannt	(AlpCon)	GMZ	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt
Krit. Elemente: Preis	Te	--	Ag, Te	Ge, Ag	Yb, Ce, In	Yb	--	(Ge)	(Ge)	--	Hf	Ge	Ge, Yb	--
Krit. Elemente: Verfügbarkeit	Te	--	Te	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Umweltverträglichkeit	unklar	unklar	Blei	unklar	OK	unklar	OK	OK	OK	OK	unklar	OK	unklar	unklar

* grobes unteres Preislimit auf Basis der Rohstoffpreise an der Rohstoffbörse (USGS) für eine typische Zusammensetzung, "x" kennzeichnet mögliche Preisssteigerungen durch Verwendung teurer Dotierstoffe

Tabelle 2: Überblick über die technologierelevanten Eigenschaften wichtiger thermoelektrischer Materialklassen. Rot eingefärbt sind Eigenschaften, die eine Anwendung aufgrund von Kosten, Stabilität oder Einsatztemperaturbereich nicht sinnvoll erscheinen lassen. Die angegebenen Preise entsprechen Untergrenzen auf Basis der Rohstoffpreise typischer Vertreter der jeweiligen Materialklasse, Anforderungen hinsichtlich der Reinheit der Elemente wurden nicht berücksichtigt.

Unternehmen im Bereich der thermoelektrischen Material- und Modultechnologie

Weltweit gibt es eine Vielzahl von Lieferanten von elementaren Rohstoffen unterschiedlicher Reinheitsstufen sowie von chemischen Verbindungen dieser Elemente. So ist es auch möglich, Materialien wie Bleitellurid, Wismuttellurid oder CoSb_3 zu kaufen. Bei genauerer Untersuchung zeigt sich jedoch, dass sich diese Materialien nicht unmittelbar für den Bau thermoelektrischer Generatoren verwenden lassen. Die genannten Verbindungen stellen jeweils nur die Basis einer thermoelektrischen Materialklasse dar. Gute funktionale Eigenschaften erreicht das Material im Regelfall erst durch Legierung und Dotierung. Die „Feinabstimmung“ der Materialzusammensetzung sowie eine optimierte Prozessführung (Temperatur, Heizraten, Drücke, Atmosphäre, Tiegelmaterialeien u.a.) bilden damit zentrale Aspekte bei der Herstellung thermoelektrischer Funktionsmaterialien. Sie stellen auch den zentralen Inhalt der technologischen Forschung zur Verbesserung thermoelektrischer Materialien dar.

Um ein thermoelektrisches Material industriell verfügbar zu machen, muss das Grundmaterial mit geeigneten Dotierungen/Beimengung, etwa den Füllatomen für Skutterudite, reproduzierbar und in ausreichender Menge hergestellt werden, um den Bau von Modulen zu ermöglichen. Deshalb ist in der Regel bei kommerziell lieferbaren, nicht thermoelektrisch optimierten Grundmaterialien eine weitere Aufarbeitung zur Synthese durchzuführen.

Die Notwendigkeit, thermoelektrisches Material reproduzierbar zu dotieren, setzt voraus, dass das Material homogen und funktionell stabil bereit steht. Es dürfen keine Verunreinigungen enthalten sein, die die Funktion oder den Syntheseprozess negativ beeinflussen.

Hersteller, die derart optimiertes Material für die TE Modulproduktion frei verkäuflich anbieten, sind aktuell nicht am Markt vertreten. Gewerbliche Modulhersteller produzieren das in ihren Modulen verarbeitete TE Material in der Regel selbst. Dies ist einerseits eine Folge der fehlenden kommerziellen Verfügbarkeit, sicherte bislang durch individuelle, optimierte Technologien aber auch die Wettbewerbsposition im Markt der Peltier-Module. In dieser Situation muss jeder Hersteller und jede Entwicklungsaktivität zur TE Modultechnologie zunächst das Problem der Materialbereitstellung auf individuellem Weg lösen.

Dies gilt entsprechend auch in Bezug auf TEG-Materialien, die für höhere Temperaturen benötigt werden. Einzelne Unternehmen bieten TEG-Komplettsysteme für Nischenanwendungen an. Hier werden Material und Modul intern oder in festen Kooperationsbeziehungen entwickelt und produziert. Zumeist werden ausschließlich die Komplettsysteme verkauft, separate Module werden aus Gründen des Know-how-Erhalts nicht abgegeben. Beispiele sind die Firmen Global Thermoelektrisch (Kanada), Teledyne (USA), ThermoGen (S), Kryoterm, Nord (RU) und Altec (Ukr).

Teilweise tauchen TEG-Module in Werbeinformationen auf. Im konkreten Beschaffungsversuch erweist sich dann jedoch, dass diese Module nicht für den Vertrieb in kleinen Stückzahlen bestimmt sind. Sie stellen meist das Ergebnis einer aufwendigen Entwicklung dar, die erst bei entsprechend großer Nachfrage tatsächlich in ein Produkt umgesetzt wird. Adressaten dieser Angebote sind Komponentenhersteller, die hohe Stückzahlen abnehmen.

Erst in jüngster Vergangenheit werden Firmen vermehrt aktiv, die thermoelektrisches Material für den freien Verkauf in Form von optimiertem Rohmaterial oder als Halbzeuge (Schenkel) für den Modulbau anbieten wollen. Beispielsweise investiert GMZ in den USA aktuell etwa 20 Millionen US-Dollar in den Aufbau der Produktion von thermoelektrischen Halb-Heusler-Materialien. Ziel dieser Investition ist es, langfristig Mengen von bis zu 100 Tonnen pro Jahr zu produzieren.

Auf dem europäischen Markt bereitet die Firma Tagma A.S. als Tochter des norwegischen Hochtechnologie-Konzerns Scatec in Zusammenarbeit mit dem DLR Köln die industrielle Produktion von thermoelektrischem Skutterudit vor. Auch hier ist mittelfristig ein Volumen von einigen Tonnen pro Jahr geplant.

Der Chemiekonzern Evonik Industries (Marl) entwickelt im BMWi-Projekt „HighTEG“ (bis September 2014) ein Konzept zur massentauglichen und kostengünstigen Herstellung von TE Modulen durch vollautomatisierte Hochdurchsatzprozesse. Diese Entwicklung wird unter Einsatz von Bi_2Te_3 -basierten Niedertemperaturmaterialien durchlaufen und soll nachfolgend auch zum Aufbau von Hochtemperaturmodulen angepasst werden.

Vor dem Hintergrund wachsenden Interesses an der Technologie der TE Generatoren und dem offensichtlichen Mangel an industriell verfügbarem thermoelektrischem Material ist davon auszugehen, dass auch andere einschlägige Unternehmen mit Vorerfahrung in der Produktion von Halbleitermaterialien an einem Markteintritt interessiert sind oder diesen eventuell schon vorbereiten.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass trotz einiger Erfolge in der jüngeren Vergangenheit noch keine fertig entwickelten Produktionstechnologien für die Herstellung thermoelektrischer Materialien in großem Maßstab existieren. Von BASF Ludwigshafen wurde bereits 2005 die Lieferung von thermoelektrischem Material mit hohem ZT angekündigt. Dennoch ist bis jetzt kein solches Material kommerziell bei BASF verfügbar. Es ist daher bei allen Wettbewerbern mit weiterem Entwicklungsaufwand hinsichtlich der Prozesstechnologie zu rechnen, bis Material tatsächlich im Maßstab von Tonnen lieferbar ist. Probefieferungen und kleinere Produktionsmengen könnten innerhalb der nächsten 1 – 2 Jahre möglich werden.

Aktuelle Entwicklungen von Unternehmen zur Technologie und Vermarktung von TEG aus jüngster Zeit wurden auf der Internationalen Thermoelektrik-Konferenz 2014 (ICT 2014, Nashville⁵) präsentiert:

- Die dänische Firma TEGnology entwickelt TEG-Modultechnologie auf Basis von Zn_4Sb_3 - und Mg_2Si -Materialien und beurteilt den Einsatz in stationären Anwendungen als aussichtsreicher als im Automobil
- Auch General Motors ordnet derzeit die Anwendung im Fahrzeug als ein Langzeitziel ein (Umsetzung ca. 2020 erwartet)
- Die kalifornische Firma Alphabet Energy nutzt neben n-leitendem Mg_2Si das neuartige Material der Thetrahedrite für den Aufbau von TEG
- GMZ Energy (Massachusetts, USA) berichtete, ca. 100 TEG-Module auf Basis von Halb-Heusler-Materialien monatlich zu produzieren, die beim Einsatz zwischen 550 °C (Quelle) und 100 °C (Senke) ca. 7 W liefern. Aktuell wird um Investoren zum Aufbau einer eigenen Produktionsstätte geworben. Derzeit werden die Module der Fa. mit einem hohen manuellen Fertigungsanteil in China hergestellt.
- Treibacher AG (Österreich) hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (IPM, Freiburg) einen Skutterudit-TEG aufgebaut. Das TE-Material wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Wien entwickelt und durch starke mechanische Umformung (Hochdruck-Torsion) in seiner Leistung verbessert. Im Labor wurden ZT-Werte bis 1,8 erreicht.
- Die Firma evident Technologies (New York, USA) trat mit der Darstellung einer skalierbaren Herstellungstechnologie für nanostrukturierte Skutterudite mit hoher TE Effektivität

Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über industrielle Entwickler und Anbieter thermoelektrischer Produkte.

Unternehmen im Bereich der Material- oder Modulentwicklung, insbesondere für TEG-Module:

ADV-Engineering, Russland (<http://adv-engineering.com>)

Wismuttellurid Ingots und Wafer, Peltiermodule

Altec, Ukraine (<http://ite.cv.ukrtel.net/altec>)

Peltier- und Generatormodule

⁵ A. Sesselmann, DLR Köln, persönliche Mitteilung

BASF, Deutschland (<http://basf.com>)

Generatormodule

Corning, USA (www.corning.com)

Skutterudite

Gentherm, USA (www.gentherm.com)

Peltiersysteme, Generatoren, Modulentwicklung

Global Thermoelectric, Kanada (<http://www.globalte.com>)

Bleizinntellurid-Module

GMZ Energy, USA (www.gmzenergy.com)

Halb-Heusler-Material

Hi-Z Technology, USA (<http://www.hi-z.com>)

Generatormodule: Wismuttellurid

Komatsu Electronics, Japan (<http://www.komatsu-electronics.co.jp/english>)

Wismuttellurid, Magnesiumsilizid, HMS, Generatormodule

Marlow Industries, USA (<http://www.marlow.com>)

Skutterudite, Generatormodule, größter Hersteller thermoelektrischer Produkte

MicroPelt, Deutschland (<http://www.micropelt.com>)

Dünnschichtmodule

Romny Scientific, USA (<http://romny-scientific.com>)

Magnesiumsilizid

TEGma AS, Norwegen (<http://www.tegma.no/en.aspx>)

Skutterudite

TEGnology, Dänemark (<http://tegnology.dk>)

Zink-Antimonide

Tellurex, USA (<http://www.tellurex.com>)

Generatormodule: LASTT + Skutterudit

Toshiba, Japan (<http://www.toshiba.co.jp/worldwide/>)

Generatormodule

Treibacher AG, Österreich (<http://www.treibacher.com/de/home.html>)

Skutterudite

evident Technologies, USA (<http://www.evidenttech.com>)

Skutterudite

Anbieter von Peltiermodulen und Produkten auf der Basis von Bismuttellurid-Modulen.
Teilweise handelt es sich hierbei auch um Vertriebsfirmen:

Beijing Huimao Cooling Equipment, China (<http://www.huimao.com>)

Cidete Ingenieros SL, Spanien (<http://www.arrakis.es>)

Copernica, England (<http://www.copernicaltd.co.uk>)

Custom Thermoelectric, USA (<http://www.thermolytecorp.com>)

Engineering and Production Company INTERM, Ukraine (<http://www.interm-info.com>)

Fandis, Italien (<http://www.fandis.it>)

Ferrotec, USA (<http://www.ferrotec.com>; <http://www.ferrotec-europe.de/>)

Fujitaka, Japan (<http://www.fujitaka.com>)

General Electric, USA (<http://www.ge.com>)

Hebei IT Shanghai, China (<http://www.hebeiltd.com.cn>)

HiTech Technologies, USA (<http://www.hitechtec.com>)

IBM, USA (<http://www.ibm.com>)

Kryotherm, Russland (<http://www.kryotherm.ru>)

Melcor Corp., USA (<http://www.melcor.com>)

Nextreme Thermal Solutions, USA (<http://www.nextremethermal.com>)

Ostern, Russland (<http://www.ostern.ru>)

panco GmbH, Deutschland (<http://www.panco.de>)

QUICK-OHM Kuepper, Deutschland (<http://www.quick-cool-heattransfer.com>)

Redfish Photonics, USA (<http://www.redfishphotonics.com>)

RIF Corporation, Russland (http://www.rif.vrn.ru/product/thermo/index_.html)

S&PF "Module", Ukraine (<http://www.ukrainetrade.com/modul>)

SCTB NORD, Russland (<http://www.sctbnord.com>)

Sensor Controls, Japan (<http://www.peltiers.jp>)

Taicang TE Cooler, China (<http://www.taileng.com>)

Taihuaxing Trading/Thermonamic Electronics, China
(<http://www.sitechina.com/thermoelectric/home.html>)

TECA, USA (<http://www.teca.us>)

TE Technology, USA (<http://www.tetech.com>)

Thermion, Ukraine (<http://www.thermion-company.com>)

Thermix, Ukraine (<http://www.thermix.com.ua>)

WeTec, Italien (<http://www.wetec.it>)

Life Cycle Assessment

Die Aufwand/Nutzen-Bilanz thermoelektrischer Materialien und darauf basierender TEG sollte im Rahmen des Life Cycle Assessment ganzheitlich über den gesamten Produktzyklus von der Rohstoffgewinnung bis zum Recycling am Ende der Nutzungsperiode bewertet werden. Dies umfasst nicht nur die Energie-, CO₂- und Kosten-Bilanz, sondern auch weitere Einflüsse auf Umwelt und Menschen [46].

Aus ökonomischer Sicht sind besonders die Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten zu berücksichtigen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Lebenszykluskosten eines TEG der Firma Global TE [3], wobei die Kosten für die Entsorgung hier nicht berücksichtigt sind. Es zeigt sich, dass sich nach anfänglich relativ hohen Installationskosten die Betriebskosten für TEG-Systeme nach wenigen Jahren deutlich positiver entwickeln als die für Photovoltaik-Anlagen (PV) oder verbrennungsmotorbetriebene elektrische Generatoren (Gensets). Die zeitlich ansteigenden Kosten für die Photovoltaik sind wesentlich durch den zyklischen Austausch der Akkumulatoren begründet, während für die Gensets hauptsächlich die notwendigen Wartungsarbeiten laufende Kosten verursachen.

In diesem Zusammenhang sollen zwei Aspekte besonders hervorgehoben werden: Einerseits soll die Nettoenergiebilanz über den gesamten Lebenszyklus positiv ausfallen, d.h. die durch den Generator produzierte elektrische Energie sollte die aufgewendete Energie für Herstellung und Recycling übersteigen. Andererseits stellt das Recycling der TEG am Ende ihrer Nutzungsdauer ein zentrales Thema dar, das die Bewertung der Thermoelektrik aus ökologischer Sicht maßgeblich beeinflusst.

Weilguni et al. präsentierten 2012 [47] eine Abschätzung der Energiemenge, die für die Produktion eines hypothetischen thermoelektrischen Generators für das Fahrzeug auf Quantum-Well Basis mit ca. 1 kW Leistung nötig ist. Sie ermittelten unter Modellannahmen einen Wert von ca. 24 MWh elektrischer Energie von der Rohstoffgewinnung bis zum fertigen Generator. Das Recycling wurde dabei nicht berücksichtigt. Unter diesen Annahmen rekuperiert ein TEG innerhalb der typischen Nutzungsdauer eines Pkw nur etwa 1/3 der für seine Produktion aufgewendeten Energie. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine spezielle Bauform gewählt wurde (Quantum-Well), die den Produktionsaufwand gegenüber Bulk-Modulen deutlich erhöht.

Andreas Patyk, KIT [48] kommt in seiner Studie zu thermoelektrischen Generatoren in motorbetriebenen Generatoren (z.B. diesel- oder biogasbetriebene elektrische Generatoren)

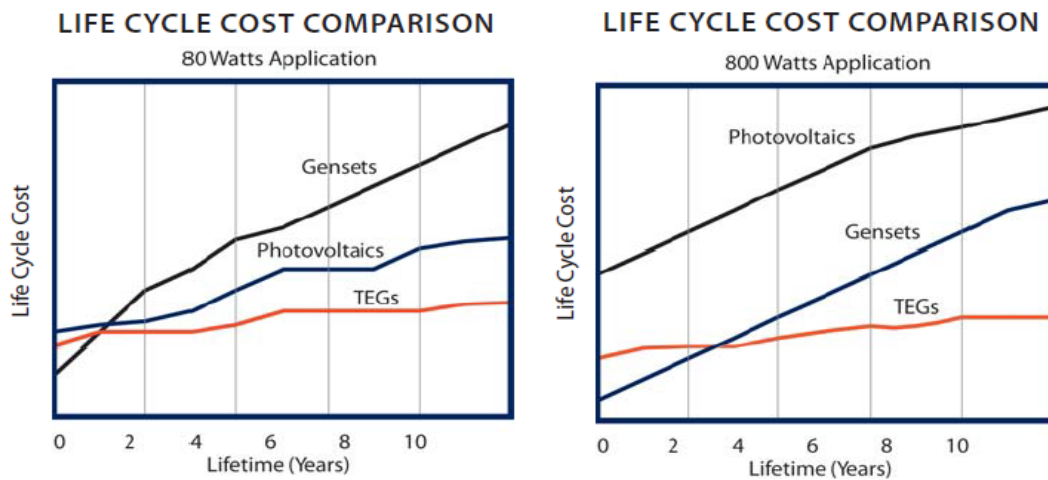


Abbildung 6: Kosten von TEGs im Vergleich zu anderen Systemen (Quelle: Global TE)

zu dem Schluss, dass die für die Produktion eines TEG benötigte Energie problemlos im Betrieb durch die gewonnene elektrische Energie kompensiert werden kann. Bereits in einer früheren Veröffentlichung beschreibt er, dass der Großteil der Energie bei der Herstellung von TEG auf die Rohstoffe Aluminium und Stahl entfällt, wohingegen das eigentliche TE-Material und die Produktion der Module nur einen geringen Anteil haben [46]. In seiner Studie [48] kommt er zu dem Schluss, dass TEG insbesondere für kleinere Anwendungen vorteilhaft sind, jedoch in jeder der untersuchten Größendimensionen eine positive ökologische Bilanz hinsichtlich Energie, Klimawirkung und toxikologischer Aspekte erreichen.

Um die Klima- und Umweltwirkung des TEG zu bewerten, ist nicht nur die Netto-Energiebilanz zu berücksichtigen, sondern auch die bei der Produktion erzeugten bzw. durch den TEG im Betrieb eingesparten Emissionen und sonstigen Umweltwirkungen, so dass auch bei negativer Energiebilanz aus ökologischer Sicht der Einsatz von TEG sinnvoll sein kann.

Während eine Bewertung der Modulherstellung auf Grundlage der verwendeten Materialien und Prozesse verhältnismäßig gut durchgeführt werden kann, ist die Datenlage zu Entsorgung bzw. Recycling sehr spärlich, da es sich bisher um einen Nischenmarkt handelt. Viele Komponenten eines TEG (metallische Brücken, Keramiken) können über bekannte Prozesse recycelt werden. Bei den TE Funktionsmaterialien ist eine generelle Aussage aufgrund der Vielfalt verschiedener Materialien und Dotierungen nicht möglich. Für das Recycling thermoelektrischer Funktionsmaterialien kann unter Umständen auf die Erfahrungen und das Know-how aus dem Recycling elektronischer oder photovoltaischer Komponenten, die ähnliche, teils komplexe Halbleiterverbindungen nutzen, zurückgegriffen werden. Entsprechende Studien und Erfahrungen aus der industriellen Praxis speziell für thermoelektrische Materialien fehlen bisher, so dass weder eine präzise allgemeine noch spezielle Aussage zu einzelnen Materialklassen ohne umfangreiche spezifische Studien möglich ist.

Stationäre Abwärmenutzung

Die Diversität und der Umfang der industriellen Anwendungen mit hohem Abwärmeeinkommen in NRW sind weit größer als in dieser Studie erfasst werden kann. Jedoch sollen hier an zwei Beispielen die typisch auftretenden Temperaturen und Wärmemengen abgeschätzt und eine qualitative Potentialbewertung für thermoelektrische Generatoren vorgenommen werden.

Für den Einsatz der Thermoelektrik in stationären Anwendungen ist der Aufbau spezifisch angepasster TEG-Systeme notwendig. Dies beinhaltet die Integration einer Vielzahl einzelner TE Module in einem System aus Heiß- und Kaltseiten-Wärmetauschern mit möglichst hohem Wärmefluss durch die TEG-Module, ohne dabei deren maximale Einsatztemperatur zu überschreiten. Dazu ist eine sehr gute thermische Kopplung der Module an die Wärmetauscher notwendig. Diese sollte idealerweise stoffschlüssig sein, wird aber vereinfachend oft kraftschlüssig ausgeführt, da man damit eine ggf. komplizierte thermomechanische Anpassung umgehen kann. Dies kann bei stationären Anwendungen akzeptiert werden, da hier Masse und Bauraum zur Herstellung des Kraftschlusses unkritisch sind; dies stellt einen wesentlichen Unterschied zu den gewichtsoptimierten Anwendungen im automobilen Bereich dar. Bei sehr heißen Quellen können stationär auch recht unaufwendige Strahlungsabsorber eingesetzt werden.

Die geeignete Wahl der Wärmetauscher kann mit einer Moderatorfunktion für Eintrittstemperaturen oberhalb der maximalen Betriebstemperatur der eingesetzten TE Module verknüpft werden; zum anderen kann ein Wärmetauscher ggf. im diskontinuierlichen Betrieb oder bei kurzzeitig variierenden Quellentemperaturen als thermischer Tiefpass wirken und für eine zeitliche Glättung der Wärmeversorgung und damit die Vermeidung von Verlusten durch Fehlanpassung sorgen.

Auch die elektrische Verschaltung mehrerer TE Module miteinander bietet Optimierungspotential, da diese ggf. unterschiedlichen Temperaturdifferenzen ausgesetzt sind und damit bei gleichem Strom (Reihenschaltung) in unterschiedlichem Anpassungszustand laufen, woraus ebenfalls Leistungsverluste resultieren können.

Je nach Anwendung können kommerzielle Module eingesetzt werden (Niedertemperaturbereich) oder es müssen TE Module eigens entwickelt werden (Hochtemperaturbereich). Hier gibt es eine Reihe von Anwendungen, bei denen eine Prozesstemperatur relativ fix vorgegeben ist, während bei anderen die Temperaturen in bestimmten Grenzen eingestellt bzw. auf verschiedenen Niveaus über einen breiteren kontinuierlichen Bereich abgegriffen werden können. So ist in der glasverarbeitenden Industrie mit Abwärm Temperaturen bis 1000 °C eine Moderation der Heißseitentemperatur erforderlich, um die TE Module vor Überhitzung und Ausfall zu schützen. Da in diesem Temperaturbereich der Wärmetransport

zum TEG durch Strahlung erfolgen kann, ist eine Temperaturvariation zwischen 100 und 1000 °C auf der Heißseite des TEG durch Wahl des Abstandes zur Wärmequelle möglich.

Niedertemperaturbereich

Als Niedertemperaturbereich wird der Einsatz von TE Modulen mit einer Heiseitentemperatur von maximal 250 °C bezeichnet. Hier könnten kommerziell erhältliche TE Module auf Bi_2Te_3 -Basis eingesetzt werden. Dies ist besonders für Anwendungen interessant, bei denen die Abwrmetemperaturen im Bereich zwischen 100 und 250 °C liegen, da hier eine direkte Ankopplung des TEG an die Wärmequelle möglich ist (Beispiel Kunststoff-Extrusion).

Aber bei höheren Abwrmetemperaturen kommen kommerzielle TE Module in Frage. Dazu muss die Wärme über einen geeigneten Moderator auf der Heißseite übertragen werden, der eine Überhitzung der TE Module vermeidet. Ein solcher Moderator kann im einfachsten Fall eine Leitungsstruktur sein, entlang derer es zu einem Temperaturabfall (allerdings auch zu einem Wirkungsgradverlust) kommt. Bei einer großflächigen TEG-Anwendung und Verwendung einer massiven thermischen Leitungsstruktur stellt hier jedoch die Menge des notwendigen Metalls ggf. einen erheblichen Kosten- und Gewichtsaspekt dar. Deshalb ist die Verwendung von geeignet dimensionierten Wärmetauschern mit Verteilerfunktion deutlich effizienter, die die Wärme bei hoher Temperatur an der Wärmequelle aufnehmen und großflächig bei geringerer Temperatur an die TE Module abgeben (siehe Beispiel Aluminium-Produktion).

Bei Quellentemperaturen oberhalb ca. 500 °C stellt der Wärmetransport durch Strahlung einen signifikanten Anteil des Gesamtwrmetransports dar. ber Strahlungsabsorber kann hier die Wärme einer heißen Oberfläche (z. B. eines glühenden Metallteils) in die Module

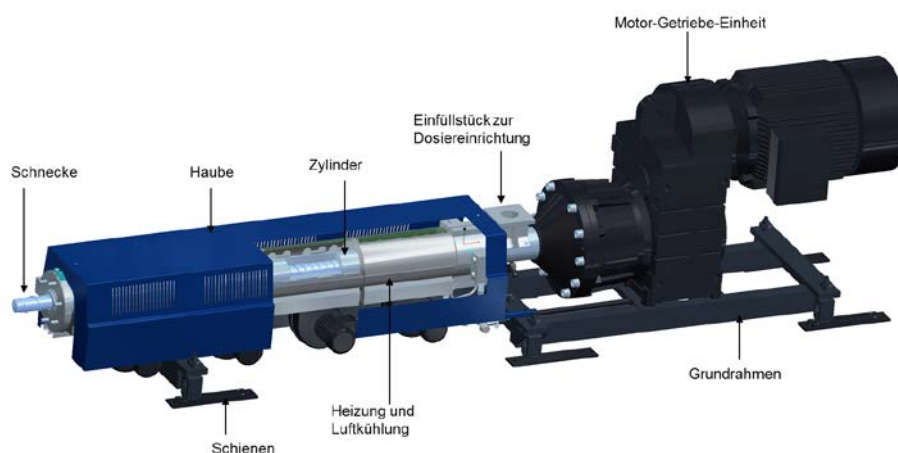


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Extrudiermaschine zur Kunststoff-Verarbeitung (Quelle: Reifenhäuser)

eingekoppelt werden, so dass auf eine materialschlüssige Ankopplung oder flüssige Medien verzichtet werden kann.

Beispiel Kunststoff-Extrusion

Die Fa. Reifenhäuser in Troisdorf betreibt und produziert Extrudiermaschinen zur Umformung von Kunststoffen (siehe Abbildung 7). Hierbei wird das Polymer zunächst auf Erweichungstemperatur aufgeheizt und dann entlang der Umformstrecke des Extruders definiert abgekühlt. Die Heiz- und Kühlstrecke besteht dabei im Wesentlichen aus einer zylinderförmigen Grundeinheit in einer quaderförmigen Ummantelung. Hier treten Temperaturen bis zu 250 °C auf.

Entlang der Verarbeitungsstrecke unterscheidet man vier Abschnitte mit unterschiedlichen Temperaturbedingungen, die für die Ankopplung von TE Modulen geeignet sind (Abbildung 8). Auf der Grundlage der thermoelektrischen Eigenschaften typischer handelsüblicher Bi-Te-basierter TE Module lassen sich daraus die entsprechenden Wärmeflüsse errechnen. Hieraus wurden in den einzelnen Temperaturabschnitten mit exakten 1D-Modellrechnungen typische Leistungen zwischen 7 und 13 W und Wirkungsgrade zwischen 4,5 und 6% pro Modul prognostiziert. Aufgrund von thermischen Übergangswiderständen ist die reale Leistungsausbeute etwas geringer. Die Einspeisung der gewonnenen elektrischen Energie wird bevorzugt über eine Leistungselektronik geführt, deren typischer Wirkungsgrad bei ca. 90% liegt.

Die Geometrie eines gängigen Extruders erlaubt den Einsatz von max. 500 Modulen pro Maschine. Hieraus ergibt sich in einer Abschätzung des Wirkungsgrades von ca. 5% eine elektrische Leistung des TEG von ca. 4-5 kW pro Extrudiermaschine. Da die Maschinen im Dauerbetrieb arbeiten, steht die elektrische Leistung kontinuierlich zur Verfügung.

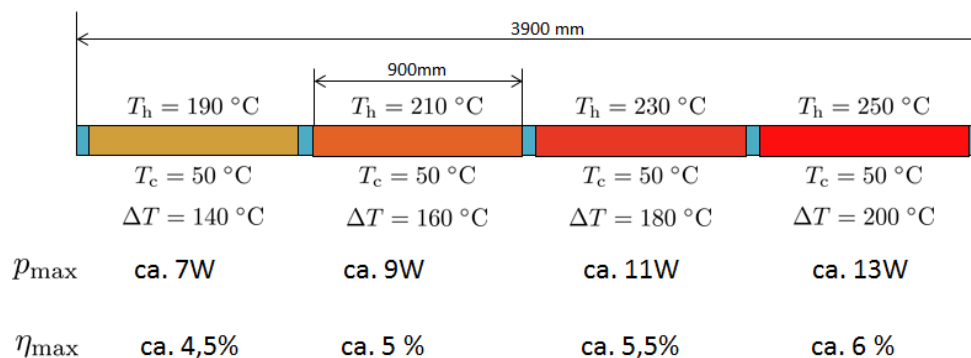


Abbildung 8: Simulierte elektrische Leistung und Wirkungsgrade eines einzelnen kommerziellen thermoelektrischen Moduls an verschiedenen Sektionen eines Kunststoff-Extruders

Beispiel Aluminium-Produktion

Das BMBF-Forschungsprojekt „Prozess- und Abwärme Wandlung in elektrischen Strom“ (kurz PAWELS, Laufzeit 01.04.08 - 31.12.10) verfolgte das Ziel, Abwärme aus der industriellen Aluminiumproduktion zu nutzen und einen Teil davon in elektrische Energie umzuwandeln⁶. An einem heißen Aluminium-Barren sollte beim Abkühlprozess von 600 °C auf 100 °C in einem Demonstrationsaufbau elektrischer Strom erzeugt, sowie die Leistung gemessen und verfügbar gemacht werden. Die Ausgangstemperatur liegt deutlich über der Grenztemperatur für den Einsatz kommerzieller TE Module, so dass eine direkte Ankopplung nicht möglich war. Daher wurde ein Lösungsansatz verfolgt, bei dem die Wärme aus dem Barren nicht direkt in den TEG eingekoppelt wurde, sondern ein Flüssigwärmetauscher in Kontakt mit dem heißen Barren gebracht wurde, in dem ein geeignetes Thermoöl aufgeheizt wurde. Das heiße Thermoöl gab über einen weiteren Wärmetauschers die aufgenommene Wärme an den TEG ab, der dabei in einiger Entfernung von der Wärmequelle angeordnet war.

Unter Berücksichtigung der spezifischen Wärme von Aluminium (900 J/kgK) lässt sich die Wärmemenge, die bei einem Abkühlprozess frei wird, zu ca. 450 MJ pro Tonne abschätzen. In Deutschland werden pro Jahr ca. 1 Mio Tonnen Aluminium hergestellt⁷ (2011: 432.000 t Primäraluminium, 634.000 t Sekundäraluminium), wobei die größten deutschen Hersteller (Hydro Norsk, AluNorf, Trimet, Alcoa) in NRW angesiedelt sind. Schätzt man den Anteil des Landes NRW am Gesamtvolumen der Bundesrepublik zu ca. 70% ab, ergibt sich in NRW eine Abwärmemenge von ca. 100 GWh (die aus systemtechnischen Gründen jedoch nur teilweise für TEG-Systeme nutzbar sind). Bei einer angenommenen Nutzbarkeit von nur 10% und einem mittleren Wirkungsgrad des TEG von 5% ergäbe sich für die Abkühlwärme von Aluminium eine erschließbare elektrische Leistung in der Größenordnung von 0,5 GWh pro Jahr, die unmittelbar systemintern genutzt oder ins Netz eingespeist werden könnte; das entspricht einer jährlichen Reduktion an CO₂-Emissionen von 300 to. Da Aluminium für die Weiterverarbeitung meist noch mehrfach (zwei-, dreimal) aufgeheizt wird, skaliert auch die erschließbare elektrische Leistungsausbeute mit dieser Anzahl von Zyklen.

Beispiel Stahl-Produktion

Eine analoge Abschätzung lässt sich für die Stahlproduktion durchführen. In Deutschland werden pro Jahr ca. 45 Mio t Stahl hergestellt [49], ca. 50% davon in NRW⁸. Neben einer hohen Schmelztemperatur beim Stahlgießen (bis zu 1500 °C) wird das Material je nach Stahl-

⁶ http://www.produktionsforschung.de/kmu-innovativ/kmuprojekte/vpkmui/index.htm?KMU_ID=83&VP_ID=2672

⁷ Quelle: <http://www.aluinfo.de/index.php/produktion.html>

⁸ Quelle: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/153022/umfrage/die-groessten-stahlproduzenten-nach-produktionsmenge-in-deutschland/>

sorte und Nachbehandlung (Härten, Weichglühen, Spannungsarmglühen, ...) Temperaturen zwischen 500 und 1200 °C ausgesetzt. Für die Abschätzung der nutzbaren Wärmekapazität wird hier ein Temperaturbereich von 800 °C auf 100 °C zugrunde gelegt. Daraus ergibt sich für NRW allein für den Abkühlprozess eine Wärmemenge von ca. 2 TWh und damit, bei einer angenommenen Nutzbarkeit von 10% bei 5% TEG-Wirkungsgrad eine potentielle elektrische Leistung von 10 GWh pro Jahr; das entspricht einer jährlichen Reduktion an CO₂-Emissionen von 6000 to.

Hochtemperaturbereich

In der metallverarbeitenden Industrie treten bei vielen Prozessen Temperaturen auf, die weit oberhalb der maximalen Einsatztemperatur kommerzieller Module liegen. Entsprechend bleiben bei der Verwendung solcher Module große Anteile der verfügbaren Temperaturdifferenz ungenutzt. Wesentlich effektiver kann die Abwärme durch Hochtemperatur-TEGs umgesetzt werden. Die höhere Temperaturdifferenz zwischen Heiß- und Kaltseite liefert aus thermodynamischen Gründen einen höheren Carnot-Wirkungsgrad (siehe S. 11) und damit einen höheren Wirkungsgrad des TEG und führt damit zu einer höheren elektrischen Leistungsausbeute. Dies setzt jedoch voraus, dass die nicht gewandelte Wärme auf der Kaltseite des TEG effektiv abgeführt wird, damit ein gleichbleibend hoher Wärmestrom bei stabiler Temperaturdifferenz gewährleistet ist.

Teilweise fällt die Abwärme bei so hohen Temperaturen an, dass auch für Hochtemperatur-TEG-Module eine direkte Ankopplung nicht möglich ist. Dann ist auch hier die Verwendung von Moderatoren notwendig. Dabei sind die Anforderungen an die konstruktive Gestaltung der Wärmtauscher geringer als bei Niedertemperatur-Modulen, da ein Temperaturabfall in Kauf genommen werden kann.

Beispiel Glas-Produktion

Die Glashütte Noelle + von Campe Glashütte GmbH in Boffzen betreibt zurzeit eine ORC-Anlage zur Stromerzeugung aus einem Abgaskanal als Feldversuch (Forschungsprojekt mit BMWi), sieht aber auch weiteres großes Potential für die Verwendung thermoelektrischer Generatoren. Die Firma betreibt mehrere Glasschmelzöfen mit einer Prozesstemperatur von ca. 1450 °C. Direkt an der Außenseite der Schmelzöfen werden ca. 500 °C gemessen. Im oberen Bereich der Produktionshalle herrschen Lufttemperaturen über 120 °C. Somit steht je nach Abstand zur Wanne für neue Energierückgewinnungssysteme ein Quelltemperaturbereich von 120–500 °C zur Verfügung.

Auch die Fa. Gerresheimer Essen GmbH, ein Unternehmen der Gerresheimer Gruppe (ein führender Hersteller von Glas und Kunststoff für die Pharma-Industrie), betreibt einen ORC-

Prozess, um ihre Abwärme zu nutzen. Eine zusätzliche Verwendung von TEG-Systemen wäre auch hier denkbar.

Weltweit ist die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-TE-Materialien in den letzten Jahren weit fortgeschritten. In NRW arbeitet das DLR in Köln, u.a. in Kooperation mit dem FZ Jülich, an diesem Thema und synthetisiert und charakterisiert verschiedene Materiallegierungen hinsichtlich ihrer thermoelektrischen und mechanischen Eigenschaften. Es wurden aus der Vielzahl unterschiedlicher Materialklassen geeignete Kandidaten hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, Stabilität und Verfügbarkeit der Ausgangselemente identifiziert. Unter diesen sind die Klassen der Blei-Tellur-basierten Materialien, der Skutterudite und der Halb-Heusler-Legierungen bislang umfassend untersucht und technologisch am besten beherrscht.

Die kleinste Funktionseinheit eines TE Moduls bildet das p/n-Thermopaar (Doppelschenkel), das aus zwei thermoelektrischen Einzelschenkeln (p- und n-leitend) besteht, die durch elektrische Brücken verbunden sind (schematisch in Abbildung 9 dargestellt). Eine am DLR Köln durchgeführte Simulationsrechnung zu einem solchen Doppelschenkel aus Skutterudit-Material ergibt unter realistischen geometrischen Vorgaben eine maximale Leistungsdichte von 1.15 W/cm^2 für den Einsatz bei einer Heißeittemperatur von 450 °C und 110 °C auf der Kaltseite. Ein typisches Hochleistungsmodul im Niedertemperaturbereich weist im Vergleich maximale Leistungsdichten von ca. 0.4 W/cm^2 bei einer maximal zulässigen Heißeittemperatur von 250 °C auf⁹. Dies zeigt deutlich die höhere Leistungsfähigkeit von Hochtemperatur-Modulen. Dabei setzte die Simulation ideale elektrische und thermische Verbindungen zwischen dem TE Material und den elektrischen Brücken voraus.

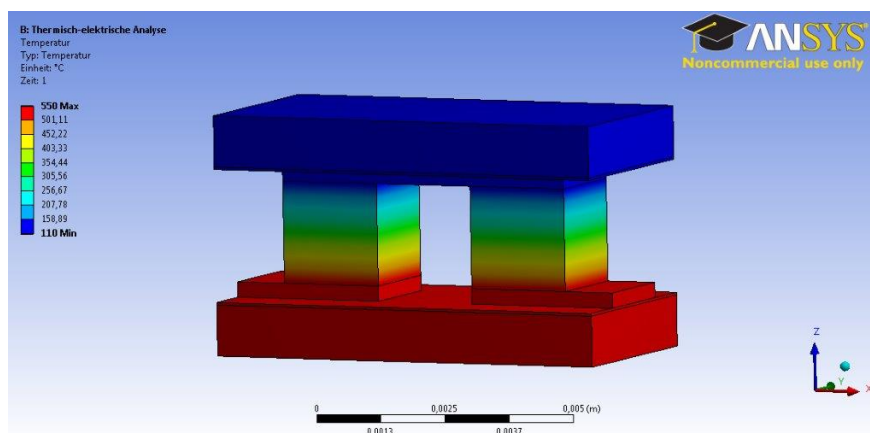


Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung einer 3D-Simulation eines TE-Doppelschenkels mit den zugehörigen metallischen Brücken und Wärmequelle (rot) bzw. -senke (blau).

Durch Reduzierung der Dicke der Module kann die elektrische Leistungsdichte weiter gesteigert werden (ausreichend hohe Kontaktqualität vorausgesetzt), wenn entsprechend hohe Wärmeflüsse am System zur Verfügung stehen. Hieraus ergibt sich als ein wesentliches Anwendungskriterium für TEG die Unterscheidung zwischen dem Fall fokussierter Abwärme (z.B. Öfen in der Glasverarbeitung) mit hohen Wärmeflüssen (= Wärmestromdichte) und Szenarien mit verteilter Wärmefreisetzung (z.B. heiße Abluft), bei denen der Wärmefluss vergleichsweise niedrig ist. Im letzten Fall ist eine Anpassung des Moduldesigns erforderlich und niedrige Kosten der TE Module sind von besonderem Interesse.

Hochleistungsmodule, z.B. auf Basis von Skutteruditen oder Halb-Heusler-Materialien, sind besonders bei fokussierter Freisetzung der Abwärme und mittleren bis hohen Quellentemperaturen geeignet. Je nach Anwendung bietet sich die Möglichkeit der TE-Material- und Kosteneinsparung durch Optimierung der Dicke des Moduls auf den Wärmestrom. Je höher der Wärmefluss umso niedriger sind die höheren spezifischen Kosten eines Hochleistungsmaterials in der Gesamtbilanz gewichtet. Bei entsprechend geringer Moduldicke spielt der TE Materialbedarf eine untergeordnete Rolle. Mit der gewählten Dicke des Moduls variiert auch der thermische Widerstand für die Abführung der Wärme aus dem System. Jeder TEG stellt im Prinzip auch ein Hindernis für die Wärmeabführung dar. Die Rückwirkung auf die Temperaturführung des Prozesses ist ggf. zu berücksichtigen und eine Beschränkung auf eine Teilbestückung verfügbarer Quellenflächen kann erforderlich sein.

In Anwendungsfällen mit geringer Wärmestromdichte kann eine Anpassung der Modulaus-

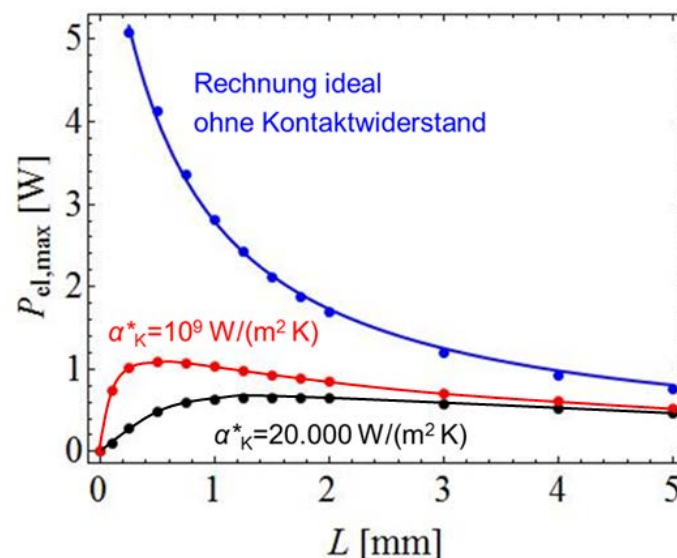


Abbildung 10: Elektrische Leistung eines TE Skutterudit-Doppelschenkels in Abhängigkeit der Schenkellänge (bestimmend für die Moduldicke). Blau: Ohne Kontaktwiderstände – ideale elektrische und thermisch Kopplung im Modul; Die rote und schwarze Kurve berücksichtigen einen typischen elektrischen Kontaktwiderstand von $100 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^2$ bei unterschiedlichen thermischen Kontakte (ausgedrückt durch den Wärmeübergangskoeffizienten α^*_K).

legung durch entsprechend höhere Dicke des TE Materials erfolgen, um den Temperaturabfall über das Modul aufrecht zu erhalten. Ein hoher Materialeinsatz wäre die Folge, so dass hier nur sehr kostengünstige Materialien in Frage kommen. Eine Alternative besteht in einer modifizierten geometrischen Auslegung der Module, mit der ein höherer Widerstand auch bei limitierter Dicke eingestellt wird.

Die wirtschaftliche Umsetzung von TEG-Anwendungen erfordert die Einhaltung eines Kostenlimits für TEG-Module in der Größenordnung von 1 €/W. Für erste Demonstrationsanwendungen ist von einer Vorgabe von 2-4 €/W auszugehen, um einerseits (abhängig vom angebotenen Wärmestrom) wirtschaftlich akzeptable Maximalkosten für das TE Material und andererseits Systemkosten und Amortisierungsfristen im Einsatz abzuschätzen.

Auf den Wirkungsgrad eines TE Moduls wirken sich neben der Güte des Aktivmaterials entscheidend auch die thermischen und elektrischen Übergangswiderstände an den metallischen Kontaktbrücken aus. Für gegebene Werte dieser Widerstände ergibt sich zur Maximierung der elektrischen Leistung jeweils eine optimale Moduldicke. Abbildung 10 zeigt beispielhaft für Skutteruditmaterial die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Moduldicke unter Berücksichtigung von elektrischen und thermischen Kontaktwiderständen. Es ist erkennbar, dass (bei ausreichend hohem Wärmefluss der Quelle) die elektrische Leistungsdichte durch höchstmögliche Kontaktqualität erheblich gesteigert werden kann.

Thermoelektrik in NRW

NRW als das am dichtesten besiedelte deutsche Bundesland bietet mit seiner vielfältigen Industrielandschaft beste Voraussetzungen für den Einsatz der Thermoelektrik zur Abwärmenutzung.

Auch bzgl. der Forschungskompetenz zur Thermoelektrik ist NRW sehr gut aufgestellt. So ist das DLR auf diesem Gebiet einer der Hauptakteure in Deutschland mit langjähriger Erfahrung auf dem Gebiet der thermoelektrischen Technologie, aber auch der Grundlagenforschung, Charakterisierung, Materialherstellung und Methodenentwicklung. An der Universität Duisburg-Essen (CENIDE) werden Nanomaterialien zur Verbesserung der thermoelektrischen Leistungsparameter entwickelt, die den Aufbau von TE Modulen auf Silizium-Basis für die Anwendung im Hochtemperaturbereich ermöglichen sollen.

Ein Vertrieb kommerzieller TE Module erfolgt durch die Fa. Quick-Ohm (Wuppertal), die auch nach Kundenanforderung Systeme auf Basis solcher Module aufbaut.

Die Fa. O-Flexx Technologies (Duisburg) stellt TE Module für den Vertrieb im Dickschichtverfahren her. Im Gegensatz zu herkömmlichen Modulen in gedeckter Bauform zeichnen sich die O-Flexx-Module (Power-Strap und Power-Cell) durch einen sehr geringen Materialeinsatz und damit kostengünstiger Herstellung aus. O-Flexx Technologies wurde vom Fachpublikum auf dem „Cleantech Forum Europe“ zum Unternehmen mit der „most promising technology“ gekürt¹⁰.

Evonik Industries (Marl) engagiert sich im BMWi-Projekt „HighTEG“ mit dem Ziel eines Konzepts zur massentauglichen und kostengünstigen Herstellung von TE Modulen. Dies erfolgt zunächst auf Basis von Niedertemperaturmaterialien. Der Ansatz hat jedoch auch Potential für die Hochtemperaturanwendung. Hier besteht die Chance, die bisher mangelnde Verfügbarkeit an Hochtemperaturmodulen zu beheben.

Auch das DLR Köln verfolgt ein Konzept zur Herstellung solcher Materialien in industrietauglichen Mengen und plant dies über die Ausgründung einer GmbH zur Vermarktung zu bringen. Dabei wird neben der Materialherstellung die Kompaktierung, Metallisierung und Vereinzelung zu Schenkeln in hoher Stückzahl adressiert, um funktionalisierte Einzelschenkel als nutzerspezifisch qualifiziertes Halbzeug zur Verfügung zu stellen. Da TEG-Anwendungen im Hochtemperaturbereich sehr individuell sind, wird von den Modul- und Systementwicklern vielfach die Verfügbarkeit von funktionalisierten Einzelschenkeln gegenüber kompletten TE Modulen bevorzugt.

Das VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI, Düsseldorf) arbeitet u. a. mit Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie und Herstellern von TEG an verschiedenen Projekten zur

¹⁰ Cleantech Forum, 20. bis 21. Mai 2014 in Stockholm

Abwärmenutzung. Dabei steht nicht die Entwicklung neuer TEG-Werkstoffe im Vordergrund, sondern die Systemintegration und industrielle Anwendung von TEG zur Abwärmenutzung.

Das Ziel eines TEG-Demonstratoraufbaus im industriellen Einsatz verfolgt das Forschungsprojekt ENERTEG (Entwicklung eines Energiewandlers zur Rückgewinnung von Prozessenergie in der Massivumformung auf Basis thermoelektrischer Generatoren). Hier wird von der Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn und der FH Düsseldorf in Kooperation mit der Seissenschmidt AG in Plettenberg ein TEG für die Abwärmenutzung bei der Massivumformung aufgebaut, der eine genauere Wirtschaftlichkeitsanalyse erlauben soll. Das Projekt hat eine Laufzeit bis Juli 2015.

Im Bereich des Heizungsbaus engagiert sich die Fa. Vaillant für die Thermoelektrik. Vaillant möchte Versuchsträger bauen und im Gerätekontext untersuchen. Untersuchungen für das Jahr 2014 sind vorgesehen. Im Fokus bei Vaillant stehen derzeit zwei Anwendungsfälle – die exergetische Abwärmenutzung von KWK- und Heizgeräten sowie die autarke Stromversorgung von Sensoren und Aktoren in der Hausenergietechnik.

Die Fa. OMNICAL Kessel- und Apparatebau GmbH, Dietzhölztal ist Hersteller und Anlagenbauer im Bereich von industriellen Kesselanlagen. Diese Anlagen sind überwiegend öl- / gasgefeuert und nutzen die Verbrennungsenergie zur Dampferzeugung. Hier können systeminterne Wärmeströme thermoelektrisch gewandelt und zur Stromversorgung elektrischer Komponenten im System genutzt werden. Hierzu zählen der Brenner selber (5 bis 45 kW) und Kesselspeisepumpen (2 bis 30 kW). Auch hier liegen im Temperaturbereich bis 400 °C Wärmeverluste vor, welche nicht zu vermeiden sind.

Das Wuppertal-Institut für Klima, Umwelt und Energie plant die Erstellung einer Studie zur Abwärmenutzung in NRW, die u.a. das Nutzungspotential von Wärmespeichern und Thermoelektrik bewerten soll und die Erstellung eines Abwärme-Katasters für NRW beinhaltet. Bei der Datenerhebung für das Kataster sollen insbesondere die spezifischen Einsatzmöglichkeiten für TEG bewertet werden.

Übergreifende Ziele der Studie sind

1. Erstellung eines industriellen Abwärmekatasters
2. Bewertung existierender Technologien und ihrer Nutzungspotenziale
3. Vertiefte Betrachtung zu thermoelektrischen Generatoren (TEG), ORC und Wärmespeichertechnologien
4. Gesamtbewertung mittels Multikriterienanalyse
5. Hemmnisanalyse und Handlungsempfehlungen

In den Niederlanden arbeitet die Fa. RGS Development B.V. an der Entwicklung einer industrietauglichen Methode zur Herstellung von thermoelektrischem Mangan-Silicid mittels des „ribbon-growth-on-substrate“ Prozesses. Dabei wird die Schmelze mit der gewünschten

Zusammensetzung zur schnellen Abkühlung auf einem Substrat direkt in Platten- bzw. Bandform gegossen.

Ein bisher kaum bekanntes potentiell Hochttemperatur-TE Material wird in Dortmund von der Fa. SmS tenzotherm GmbH hergestellt. Es zeichnet sich durch hohe Thermokraft, hohe mechanische Festigkeit und Langzeitstabilität aus. Die Firma hat bereits umfangreiche Erfahrung auf dem Gebiet der Sensorik. Die Eignung des neuen Materials für TEG-Anwendungen wird derzeit in sondierenden Untersuchungen am DLR geprüft.

Chancen für die Thermoelektrik in NRW

Die Abwärmemengen in industriellen Anwendungen in NRW sind immens hoch. Wie bereits gezeigt, ergeben sich allein aus der Abkühlenergie bei der Umformung von Aluminium bzw. Stahl signifikante Energieeinsparpotentiale (siehe S. 31ff.). Geht man von einem derzeitigen Strompreis für die Industrie von 15 ct/kWh aus [1], so lässt sich eine Amortisierungsdauer von ca. 9 Jahren für ein TEG-System berechnen. Dieser Abschätzung liegen Kostenannahmen von 10 €/W für die TE Module¹¹ sowie zusätzliche 2 €/W für das System eines TEG (Wärmetauscher, elektrische Verschaltung usw.) zugrunde, die sich auf gegenwärtige Preise für geringe Stückzahlen beziehen.

Nach Aussagen der Industrie sind Amortisierungszeiten von bis zu 5 Jahren akzeptabel, während 10 Jahre als deutlich unrentabel beurteilt werden¹². Hieraus ergibt sich eine klare Zielsetzung zur kosteneffektiveren Herstellung von TEG-Systemen. Derzeit lautet die Zielsetzung 2-4 €/W für TE Module.

Die Verringerung der Herstellungskosten von TE Modulen z.B. durch die Einführung in die automatisierte Massenproduktion, wie sie von Evonik verfolgt wird, ist sehr geeignet, TEG-Systeme für viele Anwendungen attraktiv. Simulationen zeigen, dass sich für bestimmte Anwendungen die Amortisierungsdauer durch den Einsatz von Hochtemperaturmodulen auf weniger als die Hälfte herabsetzen lassen könnte (siehe S. 34). Dieses Ziel gilt es durch die Förderung von technologischen Entwicklungen zu unterstützen, um Amortisierungszeiten von max. 4 Jahren zu realisieren.

¹¹ z.B. HZ20-Module der Fa. Hi-Z, USA

¹² Quelle: Persönliche Kommunikation mit den Firmen Dt. Edelstahlwerke und Lanxess

Beispiele für mögliche Forschungsk Kooperationen

Hoch-T-Module, Systemauslegung, Demonstratortest

Forschung/Entwicklung/Modulbau: Universität Duisburg-Essen und DLR Köln: TE Material- und Modul-Entwicklung und –charakterisierung für den Hochtemperaturbereich

Systemaufbau: Fachhochschule Düsseldorf: Erfahrungsträger beim Aufbau eines TEG-Demonstrators zur Abwärmenutzung in der Metall-Warmumformung (Fachbereiche Elektrotechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik)

Anwender: Noelle + von Campe Glashütte GmbH: gemeinsam mit FH Düsseldorf: Integration und Test eines TEG-Demonstrators an Glasschmelzöfen

oder: Fa. Seissenschmidt: Beteiligung am Projekt ENERTEG (Förderinitiative des Landes Nordrhein-Westfalens bzw. der EU (EFRE)) zum Potential der Abwärmenutzung durch TEG in der Metallwarmumformung

Nieder-T-Module, Systementwicklung und –test

Forschung/Entwicklung: iet, Institut für Energie Transformation (Prof. Bastian): Systemauslegung mit kommerziellen Modulen; Erfahrungsträger beim Aufbau eines TEG-Demonstrators für die Aluminium-Industrie

Modulbau/Systemaufbau: Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH: Prototypenaufbau
DLR kann diese Arbeiten durch TE Modulcharakterisierung unterstützen

Anwender: Deutsche Edelstahlwerke (3 Walzwerke, 2 Schmieden): Prototypentests an Warmumformstrecken

Nieder-T-Powercells, Systementwicklung und –test

Forschung/Entwicklung: FH Düsseldorf: Systemauslegung mit kommerziellen Modulen

Modulbau/Systemaufbau: O-Flexx: Power-Cell-Fertigung
DLR kann diese Arbeiten durch TE Material- und Modul-Charakterisierungen unterstützen

Anwender: AluNorf (Aluminiumproduktion): Gemeinsam mit O-Flexx Einbringen der Power-Cells zur Nutzung der Wärme aus Abluft bzw. Abgas der Walzanlagen und Schmelzöfen.

Hoch-T-Bereich, Modulentwicklung, Glashütte

Forschung/Entwicklung: DLR: Entwicklung und Charakterisierung von Hochtemperatur-TE-Materialien

Modulbau/Systemaufbau: Evonik: Umsetzung der massentauglichen Modulfertigung mit Hochtemperaturmaterialien

Anwender: Isselguss GmbH Giessereierzeugnisse: Heißwind-Kupolofen mit CO-Nachverbrennung und Heißwindtemperaturen von über 1000 °C

Nieder-T-Bereich, Modulentwicklung, Te-frei

Forschung/Entwicklung: DLR: Entwicklung und Charakterisierung von Te-freien Niedertemperaturmaterialien

Modulbau: Evonik: Umsetzung der massentauglichen Modulfertigung mit neuartigem Herstellungsprozess

Systemaufbau: Fachhochschule Düsseldorf: Erfahrungsträger beim Aufbau eines TEG-Demonstrators zur Abwärmenutzung in der Metall-Warmumformung

Anwender: Vaillant GmbH: Erfahrung in der exergetischen Abwärmenutzung von KWK- und Heizgeräten sowie in der autarken Energieversorgung von Sensoren und Aktoren in der Hausenergieversorgung.

oder/und ALUnna (Aluminiumproduktion): Abwärme an Auslaftischen zur Konvektionskühlung warmumgeformter Halbzeuge

Nieder-T-Module, Systemauslegung und –test

Forschung/Entwicklung: VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH: Erfahrungsträger zur Abwärmenutzung mittels TEG in der Eisen- und Stahlindustrie. Technisch-wirtschaftliche Untersuchung der Abwärmeverstromung im Niedertemperaturbereich (< 150 °C).

Modulbau/Systemaufbau: Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH: Prototypenaufbau

DLR kann diese Arbeiten durch Simulationsrechnungen und Charakterisierung unterstützen.

Anwender: BERZELIUS Stolberg GmbH: Zahlreiche ungenutzte Abwärmequellen vorhanden, die mit bisherigen Ansätzen aufgrund zu niedriger Energieströme nicht wirtschaftlich nutzbar sind (QSL Reaktor, Schwefelsäureerzeugung, Kesselfeuerungen Raffination)

NRW verfügt über weltweit anerkannte exzellente Materialforschung auf dem Gebiet der Thermoelektrik. Deshalb sollte das Programm auch Materialgrundlagenforschung z.B. auf dem Gebiet der Gitterdynamik enthalten zum besseren Verständnis und der Weiterentwicklung der bestehenden und neuen TE Materialien.

Roadmap

Zusammenfassung

Eine effiziente Nutzung der gesamtgesellschaftlich aufgewendeten Energie erlangt angesichts zunehmender Knappheit an fossilen Brennstoffen und steigender Umweltbelastung durch Emission von CO₂ und Schadstoffen globale Bedeutung. Industrielle Prozesse mit großer Wärmeentwicklung bieten die Möglichkeit, einen Teil der ungenutzten Abwärme als elektrische Energie zurückzugewinnen. Dabei fallen die größten Abwärmemengen in einem Temperaturbereich bis ca. 450 °C an; jedoch steht Abwärme in vielen Fällen auch bei höheren Temperaturen zur Verfügung.

Eine Option der Abwärmenutzung bieten thermoelektrische Generatoren (TEG), die eine direkte Wandlung von thermischer in elektrische Energie ermöglichen. Hierbei sind heute zwei Bereiche der Anwendungstemperaturen zu unterscheiden. Für Temperaturen bis 250 °C können kommerziell verfügbare TE Module mit typischen Wirkungsgraden von 3-4% eingesetzt werden. Zum Aufbau eines TEG, der in diesem Temperaturbereich operieren soll, werden Wärmetauscher für die Heiß- und Kaltseite der TE Module benötigt, die auf die jeweilige Anwendung abgestimmt sein müssen. Der Fokus der Entwicklung liegt hier auf der Darstellung angepasster Systeme zur optimalen Abwärmenutzung.

Im Bereich oberhalb 250 °C sind derzeit noch keine kommerziellen TE Module verfügbar. In den vergangenen Jahren wurden rasche Fortschritte bei der Entwicklung thermoelektrischer Materialien erreicht und große Anstrengungen auf Technologieentwicklungen konzentriert, die die Entwicklung und Felddemonstration hochtemperaturfähiger TEG-Module zum Ziel haben. Hocheffiziente TE Materialien wurden identifiziert und wesentliche Fortschritte beim Aufbau thermoelektrischer Hochtemperatur-Module wurden in den vergangenen Jahren erzielt. Informationen zu Materialverfügbarkeit, Kosten und Vertreibern wurden erhoben und das Thema Life-Cycle-Assessment einbezogen.

Im Bereich der Nutzung industrieller Abwärme durch thermoelektrische Generatoren sind bislang nur wenige Anwendungen identifiziert. Günstig ist eine Wärmestromdichte in der Größenordnung von mindestens 10 W/cm², damit die elektrische Leistungsausbeute pro TE Modul ausreichend hoch ist. Andernfalls sinkt die spezifische Leistung, was sich nachteilig auf Amortisationszeiten auswirkt. Besonders vorteilhaft sind Konstellationen, in denen hohe Wärmeflüsse bei hohen Temperaturdifferenzen bereitstehen. Demgegenüber ist z. B. die Nutzung der Abwärme von Kühltürmen aufgrund der geringen Wärmestromdichten kaum möglich, wenn man nicht den direkten Kontakt an die Heißwasserleitungen nutzen kann. Bei vielen industriellen Prozessen treten jedoch deutlich höhere Wärmestromdichten auf.

Im höheren Leistungsbereich pro Aggregat (kW) besteht eine Konkurrenzsituation mit ORC-Anlagen mit typischen Wirkungsgraden von 10-20%. In bestimmten Szenarien wiegen aber

Vorzüge der Thermoelektrik wie Langlebigkeit, hohe Zuverlässigkeit und minimaler Wartungsaufwand ihren etwas geringeren Wirkungsgrad auf. Hier muss eine genaue Analyse der Einsatzbedingungen und Aufwandsabschätzungen im Einzelfall über die Systemwahl entscheiden.

Die Recherchen zur Studie zeigten, dass die Möglichkeiten und Chancen der Thermoelektrik im industriellen Umfeld in NRW vielfach noch zu wenig bekannt sind. In vielen Kontakten konnte großes Interesse für die Thematik geweckt werden, das weiter ausgebaut werden sollte. Dies zeigt auch der Rücklauf der angeforderten Steckbriefe (im Anhang). Diese können nur einen kleinen Teil der Industrielandschaft in NRW abbilden. Es wurde darüber hinaus deutlich, dass vielfach genauere Informationen über anfallende Abwärmemengen und -temperaturen nur unzureichend bekannt oder nicht für die Veröffentlichung freigegeben sind.

Insgesamt ist festzustellen, dass es für die Nutzung industrieller Abwärme zur Verstromung durch den Einsatz von TEG großes Potential gibt. Jedoch sind die Abwärmemengen und die Stromdichten, in denen sie auftreten, bislang nicht hinreichend genau untersucht. Die Identifikation und Quantifizierung von ungenutzten industriellen Abwärmeströmen bedarf der Unterstützung der Industriepartner und erfordert eine genaue Betrachtung des jeweiligen Systems, der individuellen Einsatzmöglichkeiten, Implementierung von Wärmetauschern in bestehende Prozesse, auftretende Temperaturen und Wärmeströme. Solche Analysen sind Voraussetzung für eine zuverlässige spezifische Bewertung der Nutzenpotentiale.

Das Wuppertal-Institut plant eine umfangreiche Studie zu Potentialen der industriellen Abwärmenutzung und -speicherung (siehe Kap. Thermoelektrik in NRW). Dies soll die Erstellung eines Abwärmekatasters für die Industrie in NRW beinhalten. Dieses wäre für eine genauere Bewertung speziell des Anwendungspotentials von Thermoelektrik für die Abwärmeenergieumwandlung von großem Nutzen.

Notwendige Aktivitäten zur Umsetzung

Das Potential der Anwendung thermoelektrischer Generatoren für die Abwärmenutzung in stationären Systemen ist bei der Industrie noch wenig bekannt. Deshalb sollten hier Maßnahmen zur weiteren Information unternommen werden. Dies kann durch Flyer, gezielte Informationsveranstaltungen oder Symposien mit breiter Teilnehmerschaft geschehen. Die IHK Bonn hat im Frühjahr 2013 gemeinsam mit dem DLR einen Workshop ins Leben gerufen, der die Thermoelektrik einem interessierten Kreis aus Mitarbeitern von klein- und mittelständischen Unternehmen näher bringen sollte. Hieraus hat sich ein Arbeitskreis gebildet, der das Ziel verfolgt, einen TEG-Demonstrator an einem Keramikbrennofen aufzubauen.

Die Detailanalyse der industriellen Abwärme-Prozesse, die für eine wirtschaftliche Anwendung der Thermoelektrik in Frage kommen, sowie die Umsetzung von Demonstrationsprojekten kann nur in direkter Zusammenarbeit der jeweiligen Industriepartner mit erfahrenen F&E-Partnern geschehen. Dies kann durch Maßnahmen der Landespolitik initiiert und flankiert werden. So sollte ein Forschungsprogramm Arbeiten fördern, die in einer Bewertungsstufe das Anwendungspotential im konkreten Industriesystem unter Berücksichtigung der Prozessparameter (Temperaturen, Wärmemengen, -trägermedien, Anlagengeometrie, erforderliche Wärmetauscher und Kopplungsmöglichkeiten) abschätzen. Mit diesem Input kann in Simulationen das Anwendungspotential beurteilt werden. Aufbauend kann die Umsetzung aussichtsreicher Ansätze erfolgen und in Demonstratoranlagen umgesetzt werden, die eine praktische Überprüfung der Wirtschaftlichkeit und damit eine gesicherte Bewertung erlauben.

In parallelen Arbeitslinien sollten Nieder- und Hochtemperaturlösungen adressiert werden. Im Temperaturbereich bis 250 °C sollen hier kommerzielle TE Module zum Einsatz gebracht werden und Erfahrungen zur TEG-Systementwicklung und Implementierung ins Gesamtsystem aufgebaut werden. Für Temperaturen oberhalb 250 °C sind stärkere Aktivitäten auf die Entwicklung von Hochtemperatur-TEG-Modulen bis zu ihrer Erprobung unter Realbedingungen zu konzentrieren. Eine zentrale Rolle nimmt hier die Entwicklung einer langzeitstabilen AVT ein.

Auf dieser Basis erfolgte die Auswahl exemplarischer Vorschläge für Forschungskooperationen exzellenter Partner.

Handlungsempfehlungen; Lücken in Vernetzungs- und Forschungsthematik

Forschung: Die Themengebiete Material, Messtechnik, AVT sind durch DLR, FH Düsseldorf, Uni Duisburg und weitere sehr gut abgedeckt.

TE-Bauteile: TE Module für Anwendungstemperaturen bis 250 °C sind kommerziell verfügbar; z.B. Fa. Quick-Ohm (Wuppertal), Fa. panco (Mühlheim-Kärlich, Rheinland-Pfalz). Für höhere Anwendungstemperaturen müssen solche Module entwickelt werden. Die Bereitstellung von Modulen für Prototypen kann durch die Forschungspartner geleistet werden. Die Materialbereitstellung kann z.B. durch die Fa. TEGma GmbH (i.G.) erfolgen. Offen ist bislang die Frage eines Herstellers/Vertriebs dieser Hochtemperatur-Module.

Systementwicklung: FH Düsseldorf und FH Südwestfalen arbeiten derzeit an einem TE Demonstrator gemeinsam mit Seissenschmidt AG (Metall-Massivumformung) zur Abwärmenutzung;

Die FH Düsseldorf beschäftigt sich darüber hinaus intensiv mit den Themen Simulation von Wärmetransport, Entwicklung von Wärmekraftmaschinen und ORC-Prozessen, Konstruktion von Wärmeüberträgern sowie der Entwicklung von neuen Kühlkonzepten und Kreisläufen zur Effizienzsteigerung in der Thermoelektrik.

das Betriebsforschungsinstitut (BFI) in Düsseldorf befasst sich mit der Beratung von Betrieben bei der Umsetzung einer Verstromung von Abwärme mittels ORC-Anlage, Dampfmotor oder Thermogeneratoren.

Um die aus den TEG-Systemen gewonnene elektrische Energie effizient nutzen zu können sind vielfach Transformationen des Spannungslevels und Anpassung an vorhandene elektrische Netze, zur gleichbleibenden Versorgung von elektrischen Verbrauchern oder zur Aufladung von Akkumulatoren notwendig. Hierzu sind geeignete elektrische Bauelemente in den Stromkreis einzubringen.

Produktentwicklung: Für eine vermarktungstaugliche Produktion von TEG-Systemen ist derzeit in NRW kein Fertiger bekannt. Da jedoch die TEG-Systeme auf die jeweilige Anwendung angepasst werden müssen, bleibt zu klären, in welchem Umfang Standardkomponenten hier Verwendung finden können. Kundenspezifische Sonderanfertigungen leistet die Fa. Quick-Ohm, Wuppertal.

Zudem sollte die Kenntnis über die Anwendungsmöglichkeiten der Thermoelektrik der Industrie näher gebracht werden.

Literatur

1. (BDEW), B.d.E.-u.W.e.V., *BDEW-Strompreisanalyse November 2013 - Haushalte und Industrie*, 2013: http://www.bdew.de/internet.nsf/id/8DFFTD-DE_Preise.
2. Büchele, R., *Rationelle (Ab)Wärmenutzung in NRW*, in *Kooperationsprojekte im Clustermanagement Umwelttechnologien.NRW*, Exzellenz NRW.
3. *Broschüre: Thermoelectric Generators - Power where you need it*, Global Thermoelectric (www.globalte.com).
4. Rowe, D.M., *CRC Handbook of Thermoelectrics*. 1 ed1995, Boca Raton: CRC Press. 701.
5. Rowe, D.M., *Weight penalty incurred in thermoelectric recovery of automobile exhaust heat*, *Journal of Electronic Materials*. Journal of Electronic Materials, 2011. **40**(5): p. 784.
6. Kumar, S., *Journal of Electronic Materials*, 2013. **42**(4): p. 665.
7. Kaibe, H., et al., *Recovery of Plant Waste Heat by a Thermoelectric Generating System*. Komatsu Technical Report, 2011. **57**(164): p. 26-30.
8. Kuroki, T., et al. *Waste Heat Recovery in Steel Works Using Thermoelectric Generator*. in *11th European Conference on Thermoelectrics*. 2013. Noordwijk, Netherlands.
9. LaLonde, A.D., *Lead telluride alloy thermoelectrics*. *Materials Today*, 2011. **14**(11): p. 526.
10. Hachiuma, H. *Activities and Future Vision of Komatsu Thermo Modules*. in *5th European Conference on Thermoelectrics*. 2007. Odessa, Ukraine.
11. Nolas, G.S., *The Bottom-Up Approach for Thermoelectric Nanocomposites, plus....* *MRS Bulletin*, 2006. **31**(199).
12. Böttner, H., G. Chen, and R. Venkatasubramanian, *Aspects of thin-film superlattice thermoelectric materials, devices, and applications* *MRS Bulletin*, 2006. **31**(3): p. 211.
13. Snyder, G.J. and E.S. Toberer, *Complex thermoelectric materials*. *Nature Materials*, 2008. **7**(105).
14. Tritt, T.M. and M.A. Subramanian, *Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View*. *MRS Bulletin*, 2006. **31**(188).
15. Kleinke, H., *New bulk Materials for Thermoelectric Power Generation: Clathrates and Complex Antimonides*. *Chem. Mater.*, 2010. **22**: p. 604-611.

16. Uher, C. *Recent Progress in the Development of N-type Skutterudites*. in *DoE Workshop on Thermoelectrics*. 2009. San Diego.
17. Caillat, T. *Advanced High-Temperature Thermoelectric Devices*. in *DoE Workshop on Thermoelectrics*. 2009. San Diego.
18. Rogl, G., et al., *Structural and physical properties of n-type skutterudite $\text{Ca}_{0.07}\text{Ba}_{0.23}\text{Co}_{3.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}_{12}$* . Intermetallics, 2010. **18**(3): p. 394-398.
19. Rogl, G., et al., *Thermoelectric properties of novel skutterudites with didymium: $\text{DDy}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_4\text{Sb}_{12}$ and $\text{DDy}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_4\text{Sb}_{12}$* . Intermetallics, 2010. **18**(1): p. 57-64.
20. Rogl, G., et al., *New p- and n-type skutterudites with $ZT > 1$ and nearly identical thermal expansion and mechanical properties*. Acta Materialia, 2013. **61**(11): p. 4066-4079.
21. Fleurial, J.P. *Waste Heat Recovery Opportunities for Thermoelectric Generators*. in *DoE Workshop on Thermoelectrics*. 2009. San Diego.
22. El-Genk, M.S., et al., *Tests results and performance comparisons of coated and uncoated skutterudite based segmented unicouples* Energy Conversion and Management, 2006. **47**(2): p. 174-200.
23. Sakamoto, J., et al. *Fabrication and testing of skutterudite-based thermoelectric generators for waste heat recovery*. in *28th International Conference on Thermoelectrics*. 2009. Freiburg.
24. Zhao, D.G., *Interfacial evolution behavior and reliability evaluation of $\text{CoSb}_3/\text{Ti}/\text{Mo}-\text{Cu}$ thermoelectric joints during accelerated thermal aging*. Journal of Alloys and Compounds, 2009. **477**(1-2): p. 425-431.
25. Salzgeber, K., et al., *Thermoelectric materials for automotive applications?* Journal of Electronic Materials, 2010. **39**: p. 2078-2078.
26. Schmitz, A. *Development of a tubular thermoelectric generator for exhaust waste heat recovery*. in *3rd IAV Conference: Thermoelectrics*. 2012. Berlin.
27. Salvador, J.R., et al., *Thermal to Electrical Energy Conversion of Skutterudite-Based Thermoelectric Modules* Journal of Electronic Materials, 2013. **42**(7): p. 1389.
28. Garcia-Canadas, J., Journal of Electronic Materials, 2013. **42**(7): p. 1369.
29. Biswas, K., Nature Chemistry, 2011. **3**: p. 160.
30. Guo, Q.S., Acta Physica Sinica, 2010. **59**: p. 6666.
31. Rogl, G., et al., *Multifilled nanocrystalline p-type didymium – Skutterudites with $ZT > 1.2$* Intermetallics, 2010. **18**(12): p. 2435-2444.

32. Grytsiv, A., et al. *Advanced Thermoelectrics: Mischmetal-Iron-Nickel Skutterudites $MM_y(Fe_{1-x}Ni_x)_4Sb_{12}$* . in *3rd European Conference on Thermoelectrics*. 2005. Nancy, France.
33. Rogl, G., et al., *A new generation of p-type didymium skutterudites with high ZT*. Intermetallics, 2011. **19**(4): p. 546-555.
34. Rogl, G., et al., *Thermoelectric properties of p-type didymium (DD) based skutterudites $DD_y(Fe_{1-x}Ni_x)_4Sb_{12}$ ($0.13 < x < 0.25$, $0.46 < y < 0.68$)*. Journal of Alloys and Compounds, 2012. **537**(24-49).
35. Salvador, J.R. *Materials, modules and systems: An atoms-to-autos approach to automotive thermoelectric systems development*. in *3rd IAV Conference: Thermoelectrics*. 2012. Berlin.
36. Fedorov, M.I., et al., *New Interest in Intermetallic Compound ZnSb*. Journal of Electronic Materials, 2014: p. 1-6.
37. *Mineral Commodity Summaries*, in *U.S. Geological Survey, Technical Report* 2012, U.S. Department of the Interior.
38. Lu, X. and D.T. Morelli, *Natural mineral tetrahedrite as a direct source of thermoelectric materials*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2013. **15**(16): p. 5762-5766.
39. Schierning, G., et al., *Role of oxygen on microstructure and thermoelectric properties of silicon nanocomposites*. Journal of Applied Physics, 2011. **110**(11): p. -.
40. Fedorov, M. and V. Zaitsev, *Transition Metal Silicides*, in *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*, D.M. Rowe, Editor 2005, CRC Press: Boca Raton. p. 31-1 - 31-19.
41. Zaitsev, V.K., et al., *Thermoelectrics on the Base of Solid Solutions of Mg_2BIV Compounds ($BIV = Si, Ge, Sn$)*, in *Thermoelectrics Handbook* 2005, CRC Press. p. 29-1-29-12.
42. Dasgupta, T., et al., *Influence of power factor enhancement on the thermoelectric figure of merit in $Mg_2Si_{0.4}Sn_{0.6}$ based materials*. Physica status solidi (a), 2014. **in press**.
43. Tani, J., M. Takahashi, and H. Kido, *Thermoelectric properties and oxidation behaviour of Magnesium Silicide*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2011. **18**(14): p. 142013.
44. Ren, Z. *ZT enhancement by nanostructures in bulk thermoelectric materials through electron and phonon engineering*. in *3rd IAV Conference: Thermoelectrics*. 2012. Berlin.

45. Felten, F., *Thermoelektrischer Generator: Voraussetzungen für eine Industrialisierung*, 2014: Thermoelektrik Kolloquium, DLR Köln.
46. Patyk, A., *Impacts on the Environment and Sustainability*. J. Electron. Mater., 2010. **39**(9).
47. Weilguni, M., M. Franz, and N. Slyusar, *Feasibility Study and Life Cycle Energy Balance of Thermoelectric Generator Modules for Automotive Applications*. 35th Int. Spring Seminar on Electronics Technology, 2012.
48. Patyk, A., *Thermoelectric generators for efficiency improvement of power generation by motor generators – environmental and economic perspectives*. Applied Energy, 2013. **102**: p. 1448-1457.
49. Wietschel, M., et al., *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung*, in *Innovationspotenziale2010*, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Anhang

Im Folgenden sind die externen Ansprechpartner genannt, die im Verlauf dieser Studie kontaktiert wurden. Diese wurden gebeten, eine Kurzbeschreibung („Steckbrief“) ihres jeweiligen Unternehmens/Instituts zu erstellen, sowie ihre Einschätzung bzgl. möglicher Anwendungen der thermoelektrischen Abwärmenutzung in ihrem Umfeld zu geben.

Liste der Kontakte

Industrie

- Aluminium Norf GmbH, 41403 Neuss
Dr.-Ing. Klaus-Werner Döhl, Tel: 02131-937-8626, klaus-werner.doehl@alunorf.de
- Aluminiumwerk Unna AG, Uelzener Weg 36, 59425 Unna
Volker Findeisen, 02303 / 206210, Volker.Findeisen@alunnatubes.com
- Berzelius Stolberg GmbH, Binsfeldhammer 14, 52224 Stolberg
Hr. H. Ambroz, 02402 / 120653, hambroz.bbh@berzelius.de
- Deutsche Edelstahlwerke, Auestraße 4, 58452 Witten
Frau A. Gräb, 02302 / 292388, antje.graeb@dew-stahl.com
- Effizienzagentur (EFA) NRW, Dr.-Hammacher-Straße 49, 47119 Duisburg
Peter Jahns, 0203 / 3787942, pja@efanrw.de
- Evonik Industries AG, Creavis Technologies & Innovation, Paul-Baumann-Straße 1, 45772 Marl
Dr. Jens Busse, 02365 / 49-86509, jens.busse@evonik.com
- Isselburg Guß und Bearbeitung GmbH, Minervastrasse 1, 46419 Isselburg
Hr. Visser, 02874 / 39-0, visser@ihi.de
- Noelle + von Campe, Glashütte GmbH, Solingstr. 14, 37691 Boffzen
Hr. P. Sasse, 05271 / 40836, p.sasse@nuvc.de
- OMNICAL Kessel- und Apparatebau GmbH, Hauptstrasse 156, 35716 Dietzhölztal
Heribert Fasel, 02774 / 81101, h.fasel@omnical.de
- Reifenhäuser EXTRUSION GmbH & Co. KG, Spicher Straße 46-48, 53844 Troisdorf
Hr. Dr. Pohl, 02241 / 481575, tim.pohl@reifenhauser-et.com
- Seissenschmidt, Daimlerstraße 11, 58840 Plettenberg
Fabian Pingel, 02391 / 9152196, f.pingel@seissenschmidt.de
- ThyssenKrupp, ThyssenKrupp Allee 1, 45143 Essen
Christian Holzer, 0201 / 844536240, christian.holzer@thyssenkrupp.de
- Vaillant GmbH, Berghauser Str. 40, 42859 Remscheid
Thomas Badenhop, 02191 / 182242, thomas.badenhop@vaillant.de

- WZR ceramic solutions GmbH, Lise-Meitner-Straße 1, 53359 Rheinbach
Dr. Dieter Nikolay, 02226 / 169814, d.nikolay@wzr.cc

Forschung

- Betriebsforschungsinstitut GmbH - VDEh, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf
Hr. Wolfgang Bender, 0211 / 6707317, wolfgang.bender@bfi.de
- DLR Institut für Werkstoff-Forschung, Linder Höhe, 51143 Köln
Hr. Prof. Eckhard Müller, 02203 / 6013556, eckhard.mueller@dlr.de
- Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Elektrotechnik, Universitätsstraße 1, 40225 Düsseldorf
Dr. Dirk Ebling, 0211 / 8110601, Dirk.ebling@fh-duesseldorf.de
- Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Maschinenbau, Frauenstuhlweg 31, 58644 Iserlohn
Prof. Rainer Herbertz, 02371 / 566199, Herbertz.rainer@fh-swf.de
- Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich
Dr. Raphael Hermann, 02461 / 614786, r.hermann@fz-juelich.de
- iet, Institut für Energie Transformation, gUG (haftungsbeschränkt), Erzberger Straße 14, 47533 Kleve
Prof. Dr. Georg Bastian, 02821 / 5908744, info@energietransformation.org oder georg.bastian@hochschule-rhein-waal.de
- Ruhr-Universität Bochum, ICAMS, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
Dr. Georg Madsen, 0234 / 3229313, georg.madsen@rub.de
- Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Fachgebiet Nanostrukturtechnik, Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg
Prof. Dr. R. Schmechel, 0203 / 3793347, roland.schmechel@uni-due.de
- Universität Paderborn, Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Sensorik, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn
Hr. Prof. Hilleringmann, 05251 / 602225, hilleringmann@sensorik.upb.de
-

Verbände

- Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., Richard-Wagner-Straße 41, 45128 Essen
Hr. Menzler, 0201 / 8108441, g.menzler@vik.de
- Verband der Metall- und Elektroindustrie NRW (Metall NRW), Uerdingerstr. 58-62, 40474 Düsseldorf
Hr. K. Mornhinweg, 0211 / 4573241, k.mornhinweg@unternehmernrw.net

- Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU), Landesgruppe NRW, Brohler Straße 13, 50968 Köln
Hr. Untrieser, 0221 / 3770228, untrieser@vku.de

Herstellung / Vertrieb TE Material, Module und Systeme

- O-Flexx Technologies, Auf der Höhe 49, 47059 Duisburg
Holger Ulland, 0203-3635 612 0, h.ulland@o-flexx.com
- Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH, Unterdahl 24B, 42349 Wuppertal
Stefan Koch, 0202 / 404327, koch@quick-ohm.de
- RGS Development B.V., Bijlestaal 54A, 1721 PW Broek op Langedijk, Niederlande
Dr. A. Schönecker (CTO), +31-226-332951, schonecker@rgsdevelopment.nl
- SmS tenzotherm GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11, 44263 Dortmund
0231 / 47730300, info@sms-tenzotherm.de
- TEGma GmbH i.G., Linder Höhe, 51143 Köln
Andreas Sesselmann, 02203 / 6012439
- in der Entwicklung: Evonik Industries AG, Creavis Technologies & Innovation, Paul-Baumann-Straße 1, 45772 Marl
Dr. Jens Busse, 02365 / 49-86509, jens.busse@evonik.com

Steckbriefe Industrie

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Aluminium Norf GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Koblenzer Str. 120, 41468 Neuss

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr.-Ing. Klaus-Werner Döhl, Tel: 02131-937-8626, klaus-werner.doehl@alunorf.de

Dr. Klaus Meya, Tel: 02131-937-8730, klaus.meya@alunorf.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): GmbH

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Die Aluminium Norf Gesellschaft mit beschränkter Haftung produziert seit 1967 im Industriegebiet Stüttgen der damaligen Gemeinde Norf bei Neuss am Rhein. Seit der Gründung wurde das Werk praktisch ständig erweitert und ausgebaut. Die größte Erweiterung war das 1990 beschlossene, 1995 fertig gestellte zweite Warmwalzwerk einschließlich des Ausbaus der Kaltbandfertigung und neuer Schmelz- / Gießanlagen. Damit haben sich die Produktionskapazitäten in Norf fast verdoppelt und bieten heute rund 2200 Mitarbeitern Arbeit. Alunorf wuchs so zum größten Arbeitgeber in Neuss und zum weltweit größten Aluminium Walz- und Schmelzwerk. Schon 1965 wurde entschieden die Energieversorgung neben Strom rein auf der Erdgasbasis aufzubauen. Auch der Umweltschutz wurde von Beginn an durch eigene Entwicklungen unterstützt. In der Umweltchronik sind zahlreiche Beispiele gelistet. Unsere Umweltzertifizierung nach ISO14001 und die Registrierung nach EMAS sind daher auch ein Verdienst der jahrelangen Verbesserungen im Umweltschutz.

Die in den letzten Jahren deutlich steigenden Energiekosten (incl. der indirekten Kosten durch Steuern und Abgaben für erneuerbare Energien) erhöhen unsere Fertigungskosten erheblich. Um im weltweiten Wettbewerb zu bestehen, sind weitere Verbesserungen der Energieeffizienz notwendig. Diese sind Bestandteil des Umweltmanagementsystems nach EMAS.

Produziert werden hochwertige warm- und kalt gewalzte Bänder aus Aluminium. Die Produkte gehen als aufgewickelte „Coils“ an die Partnerwerke der Novelis und der Hydro, z.T. auch direkt an Kundenadressen. Dort werden daraus Produkte für die Bauindustrie, den Verkehrsbereich, den Verpackungsmarkt und den Druckbereich hergestellt, z. B. Fassadenbleche, Bedachungsprofile, Waggonbeplankung und Aufbauten für Eisenbahnwagen, LKW-Aufbauten, Menüschalen, Getränkedosen, Deckel und Schraubverschlüsse, Aluminiumfolien oder Offset-Druckplatten. Weitere Entwicklungspotenziale ergeben sich insbesondere in der Automobilindustrie. Die Fertigung

in Norf ist an hohen Qualitätsstandards ausgerichtet. Unser Qualitätsmanagementsystem ist gemäß der ISO 9001 sowie der ISO/TS 16949 (Standard der Automobilindustrie) zertifiziert.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Als Energiequellen werden im Werk ausschließlich Erdgas und elektrischer Strom sowie Diesel für Gabelstapler eingesetzt. Rund 30 % des Energiebedarfs werden durch Strom abgedeckt. Alunorf benötigte in 2013 rund 605 Mio. kWh elektrischen Strom, die im Besonderen zum Antrieb der Walzanlagen sowie zum Schmelzen der Aluminium-Späne in den Induktionsöfen aber in zunehmendem Maße auch für die Absaugung und Reinigung von gering belasteter Abluft bzw. Abgas aus der Produktion benötigt werden.

Hauptenergieträger ist mit rund 70 % Erdgas. In 2013 wurden insgesamt 1.402 Mio. kWh eingesetzt, dies entspricht ca. 140 Mio. m³ pro Jahr. Hauptverbraucher sind die Schmelzöfen. Ein erheblicher Teil der Abwärme der Schmelzöfen wird zurück gewonnen und in Form von Heißwasser zur Prozess- und Fernwärmeversorgung eingesetzt.

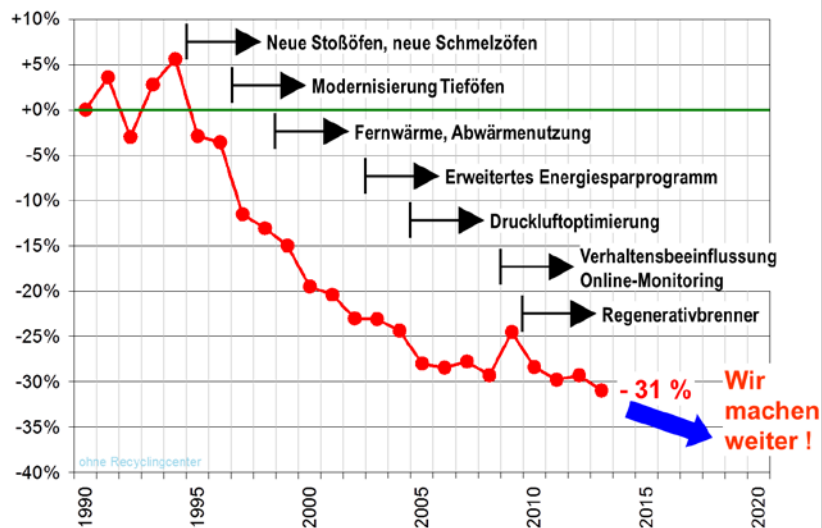
Mitte der 1990er Jahre startete unser großes Norf 2 - Projekt. Die Kapazitätsverdoppelung unserer Produktionsanlagen beinhaltete gleichzeitig viele neue energie-effizientere Betriebsweisen. Seit dem hat sich unser spezifischer Energiebedarf pro Tonne Walzband bis Ende 2013 auf 69 % verringert. Neben konjunkturell bedingten Effekten der letzten Wirtschaftskrise erhöhte vor allem das 2009-2011 in Betrieb genommene Recycling-Center als neue Vorstufe den Trend leicht negativ. Gleichwohl ist der Langzeiteffekt aller Maßnahmen deutlich positiv.

All den positiven Effekten steht jedoch eine Veränderung unserer Produktionspalette gegenüber. Dies führt im Wesentlichen zu einer höheren Fertigungstiefe unseres Walzbandes. Letztlich kann dadurch auch der spezifische Energiebedarf durch den steigenden Strom und Erdgasverbrauch je Produktionstonne steigen.

Die höhere Fertigungstiefe verursacht eine Steigerung des Energiebedarfs, was unseren Erfolg bei den Energiesparbemühungen überlagert. Die 1996 eingeführte Kennzahl für den spezifischen Energieeinsatz bezogen auf eine Tonne versandtes Walzband muss daher durch detailliertere Daten ergänzt werden. Bei der Betrachtung einzelner Produktionsstufen sind die Erfolge unserer Effizienzsteigerungsmaßnahmen allerdings klar erkennbar.

Eine Anwendung der Thermelektrik gibt es bislang nicht.

Reduzierung des spez. Energieeinsatzes:



Frage: Falls ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden sollte: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Betriebsforschungsinstitut (BFI), DLR

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Aluminiumwerk Unna Aktiengesellschaft

Adresse der Organisationseinheit: Uelzener Weg 36 in 59425 Unna

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Volker Findeisen / 02303 206210 / volker.findeisen@alunnatubes.com/

www.alunnatubes.com

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut):

Industrieunternehmen, kein KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik / eventuelle

Anwendungsmöglichkeiten:

Die Aluminiumwerk Unna AG gebraucht zur Zeit etwa 45 Mio. kWh Erdgas und 25 Mio. kWh Strom. Die politisch gewollte Verteuerung der Energie und die Umverteilung zu Gunsten vermeintlich erneuerbarer Energien führt zu einer mittelfristigen Bedrohung des 100 Jahre alten Industriestandorts in Westfalen am östlichen Rand des Ruhrgebietes. Insgesamt stehen mehr als 350 Arbeitsplätze direkt auf dem Standort Unna auf dem Spiel. Seit mehr als zehn Jahren (seit Erkennen des politischen Willens) werden sehr fokussiert Maßnahmen zur spezifischen Energieeinsparung im Bereich der Gebäudeinfrastruktur und der Antriebstechnik hydraulischer Antriebe erfolgreich vorangetrieben. Ein Großteil der eingesetzten Energie wird jedoch für thermische Prozesse zur Erwärmung unserer Aluminiummaterialien eingesetzt. Dazu gehören:

1. Schmelzen von eigenen und fremden Sekundärrohstoffen; circa 13.000 t bis 16.000 t pro Jahr, Energieträger Erdgas, klassische Herdöfen – insgesamt drei Schmelzöfen mit zweimal sechs und einmal 12 t Fassungsvermögen; offenes Gießbrinnensystem zur Gießmaschine, Wasserabkühlung des Gusses; Temperaturen bei etwa 750 bis 800°C – Flüssigphase [hierfür hatten wir uns schon einmal eine Abgaswärmerückgewinnung angesehen aber nicht umgesetzt]
2. Homogenisierung von Aluminiumrundstangen – circa 12.000 bis 15.000 t pro Jahr, 24 h Ofenreisen, Temperaturen zwischen 550 und 600° Celsius – in zwei Stoßöfen
3. Vorerwärmung von circa 20.000 t Preßbolzen auf circa 500°C und anschließende Warmumformung zu etwa 12.000 t stranggepreßte Halbzeuge, zum Teil gezielt wasserabgekühlt an den Umformmaschinen, zum Teil über Konvektion auf einige 100 m² großen Auslauftischen
4. Weichglühen von überwiegend Rohren, circa 4.000 bis 6.000 t im Jahr bei etwa 360°C circa sechsstündige Ofenreisen in drei Stoßöfen
5. Warmauslagern von circa 6.000 t Produkt pro Jahr bei etwa 160°C im Schnitt über 8 bis 16h Ofenreisen in etwa zwei weiteren Stoßöfen
6. Lösungsglühen vertikal, etwa 4.000 Ofenreisen pro Jahr, Typisch um 500°C, circa 1,5 bis 2 t brutto pro Charge inklusive Stahlkonstruktion zur Aufnahme der Rohre,

Standard Wasserabkühlung direkt aus dem Ofen heraus mit 4 m/s – innerhalb 3 bis 5 s ist alles kalt

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Wir setzen jährlich einige zehn Mio. kWh elektrischer Energie und Erdgas zur prozessbedingten Erwärmung unseres Werkstoffes ein. Das Ganze verteilt sich auf verschiedene Temperaturbereiche zwischen gut 100°C bis hin zu 800°C in verschiedensten Öfen und Erwärmungseinrichtungen. Besonderes Interesse für uns besteht in einer Analyse der sinnhaften Einsetzbarkeit thermoelektrische Systeme für unsere unterschiedlichen vor allem diskontinuierlichen Prozesse.

Ziele: Wir wären mehr als happy, wenn es zukünftig bezahlbare technische Lösungen gäbe mit denen mittel- und langfristig Wärmemengen über thermoelektrische Generatoren zumindest zum Teil zurückgewonnen werden könnten.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: BERZELIUS Stolberg GmbH (BBH)

Adresse der Organisationseinheit: Binsfeldhammer 14 52224 Stolberg

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dipl.-Ing. Heiko Ambroz/ 02402 120653 [/hambroz.bbh@berzelius.de](mailto:hambroz.bbh@berzelius.de) / www.berzelius.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Keine durchgeführten Arbeiten und auch kein Know how vorhanden.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Zahlreiche ungenutzte Abwärmequellen vorhanden, die mit bisherigen Ansätzen aufgrund zu niedriger Energieströme nicht wirtschaftlich nutzbar sind:

Abwärme QSL Reaktor

Abwärme Schwefelsäureerzeugung

Abwärme Kesselfeuerungen Raffination

Frage: Falls ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden sollte: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Durchführung eines Forschungsprogramms wäre interessant.

Keine Partner oder Kooperationen vorhanden



Studie zum Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen in NRW

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: **Deutsche Edelstahlwerke GmbH**

Adresse der Organisationseinheit: Austraße 4, 58452 Witten

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Frau Antje Gräb, Tel.: 02302/29-2388, antje.graeb@dew-stahl.com, www.dew-stahl.com

Art der Organisationseinheit:

GmbH,

Unternehmen mit ca. 4.000 MA an 4 Standorten in NRW,

Stahlherstellung und -bearbeitung

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik: bisher keine

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Als Stahlproduzenten und –bearbeiter gehört die Deutsche Edelstahlwerke GmbH zu den energieintensiven Industrien in Deutschland. Wir betreiben 2 Elektrostahlwerke, 3 Walzwerke und 2 Schmieden sowie mehr als 50 Wärmebehandlungsöfen an unseren Standorten in Witten, Siegen, Krefeld und Hagen. Dabei produzieren wir oft diskontinuierlich viel Abwärme in Temperaturbereichen > 100 °C mit unterschiedlichen Wärmeinhalten. Derzeit werden nur geringe Mengen der entstehenden Abwärme technisch genutzt.

Frage: Sollte ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Unser Interesse besteht an der möglichen industriellen Nutzung von Thermoelektrischen Generatoren zur ökonomischen Nutzung von Abwärme und der dabei entstehenden elekt. Energie.

Deutsche Edelstahlwerke GmbH
Sitz der Gesellschaft: Witten
Registriergericht: Bochum, HRB 8490
Austraße 4 - 58452 Witten
Ust-ID-Nr.: DE 811 684 405
Steuer-Nr.: Schmolz+Bickenbach Edelstahl GmbH,
Finanzamt Düsseldorf-Alttstadt 5103/5758/1113
www.dew-stahl.com
Thermoelektrik.doc

Vorsitzender des Aufsichtsrats:
Johannes Nonn

Geschäftsführer:
Dr. Martin Löwendick (Vorsitzender)
Dirk Wallesch (stv. Vorsitzender)
Jürgen Alex
Burkhard Hartmann

Commerzbank AG, Witten
BLZ: 452 400 56 - Kto.-Nr.: 7 750 003
IBAN: DE90 4524 0056 0775 0003 00
BIC: COBA DE 33 452

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: EFA - Effizienz-Agentur NRW / prisma consult GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Dr.-Hammacher-Str. 49, DE-47119 Duisburg

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr. P. Jahns / 0203-37879-42 / pja@efanrw.de / www.efanrw.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Kompetenzzentrum Ressourceneffizienz der Landesregierung NRW

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Nur theoretisch.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

In verschiedenen Beratungs- und Umsetzungsprojekten in KMU kommt immer wieder die Frage zur Nutzung niedergrädiger Abwärme (60 - 240 Grad C) auf, die zum größten Teil diffus in den Fabrikationshallen vorliegt. Diese würde von den Unternehmen gerne genutzt, und dies vorzugsweise in Form von elektrischer Energie.

Frage: Sollte ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Ein anwendungsorientiertes Forschungsprogramm würden wir begrüßen, bestehende Kooperationen sind uns leider nicht bekannt.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Evonik Industries AG, Creavis Technologies & Innovation

Adresse der Organisationseinheit: Paul-Baumann-Straße 1, 45772 Marl

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr. Jens Busse / 02365 49-86509 / jens.busse@evonik.com / www.evonik.com

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Chemische Industrie

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Sämtliche Evonik Produkte und Innovationsprojekte unterliegen einer zertifizierten Nachhaltigkeitsbewertung. Im Bereich der Innovationsaktivitäten wurde die Thermoelektrik als spannendes Forschungsfeld identifiziert, mit dem Potenzial durch die Nutzbarmachung von Abwärmen bzw. durch den Einsatz als elektrische Wärmepumpe, CO₂ Emissionen senken zu können. Aus den F&E Aktivitäten auf diesem Gebiet ist ein Konzept zur massentauglichen und kosteneffizienten Herstellung von thermoelektrischen Bauteilen für den Einsatz als thermoelektrischer Generator (TEG) oder als elektrische Wärmepumpe (Peltier-Modul) hervorgegangen. In einem vom BMWi seit April 2010 geförderten Projekt (Kurztitel: HighTEG) wird in einem Konsortium aus weiteren Projektpartnern aus der Industrie, sowie der Forschung (u. a. DLR) an der Realisierung dieses Konzepts gearbeitet.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Großes Potenzial der Thermoelektrik wird in der Nutzbarmachung von insbesondere niederkalorischer Wärme in Anwendungen gesehen, bei denen Autarkie bezüglich elektrischer Energieversorgung und/oder eine hohe Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit des Energiewandlers einen großen Stellenwert einnimmt. Zudem wird die Anwendung als elektrische Wärmepumpe für kompakte und geräuscharm arbeitenden Systemen bzw. zur dezentralen Temperierung von Raumeinheiten oder elektrischen Bauteilen als sehr interessant erachtet.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit:

Isselguss GmbH Giessereierzeugnisse

Adresse der Organisationseinheit:

Minervastrasse 1 D 46419 Isselburg

Tel: 0049(0)2874/39-0 / Fax: 0049(0)2874/39-241

Geschäftsführer: Dirk Engels und Ralf Kaiser

Sitz der Gesellschaft: Isselburg

Registergericht Amtsgericht Coesfeld, Nr. des Handelsregisters HR B 8566

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Markus Vißer / 02874 – 39277 / e-mail: visser@ihi.de / website: www.ihi.de

Art der Organisationseinheit

KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Wir sind ein leistungsstarkes, mittelständisches Unternehmen mit ca. 240 Mitarbeitern. Wir haben uns spezialisiert auf die Entwicklung, Engineering und Produktion einbaufertiger Komponenten aus Grau-, Vermicular- und Sphäroguß. Auf modernen, flexiblen Bearbeitungsstraßen fertigen wir u.a. Gehäuse, Achsen, Schwungräder, Bremsscheiben und Ölwannen. Sowohl mit selbst gefertigten Erzeugnissen wie auch mit zugekauften Teilen montieren wir einbaufertige System- Komponenten für Erstausrüster in Europa, USA und Japan.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Abwärme Nutzung unserer Schmelzeinrichtungen

- 1) Heißwind Kupolofen mit einer Schmelzleistung von ca. 16t pro Stunde und einer nachgeschalteten Thermischen CO-Nachverbrennung mit Heißwindtemperaturen von über 1000°C. (Laufzeit 4 Tage pro Woche mit ca. 16 Stunden)
- 2) 4 Elektroöfen a 6,5t Nutzhalt (Netzfrequenz)

Kooperationen aus der Industrie

Küttner GmbH, Dr. Enzenbach, 0201-7293182, Alfredstr. 28, 45130 Essen

Tel: +49 201 7293 0, Fax: +49 201 77 66 88, info@kuettner.com

Aufgabe: Umbau der thermischen Co-Nachverbrennung des Kupolofens. Diese Firma beschäftigt sich auch mit Wärmerückgewinnung.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Noelle + von Campe Glashütte GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Sollingstraße 14, 37691 Boffzen

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dipl.-Ing. Peter Sasse / 05271-40836 / p.sasse@nuvc.de / www.nuvc.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut):

Glashütte mit ca. 450 Mitarbeitern und ca. 80 Mio. Umsatz p.a.

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Bisher hat Noelle + von Campe kein Know-how bzgl. Thermoelektrik.

Als Glashütte mit einem prozessbedingten großen Anteil an Energie(kosten) sind Themen zur Energieeinsparung und –rückgewinnung von großer Bedeutung. Zurzeit betreiben wir eine ORC-Anlage zur Stromerzeugung aus unserem Abgaskanal als Feldversuch (Forschungsprojekt mit BMWi).

Wir sind gemäß ISO 50001 (Energiemanagementsystem) zertifiziert.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Wir betreiben mehrere Glasschmelzöfen mit einer Innentemperatur von ca. 1450 Grad. Direkt an der Außenseite der Schmelzöfen werden ca. 500 Grad gemessen. Im oberen Bereich der Produktionshalle finden sich immer noch Temperaturwerte von über 120 Grad. Somit stehen je nach Abstand zur Wanne - für neue Energierückgewinnungssysteme Temperaturbereiche von 120-500 Grad zur Verfügung.

Aus Sicht der Glashütte könnte zukünftig die vorhandene Strahlungswärme insbesondere durch Nutzung thermoelektrischer Effekte (z.B. Peltier-Effekte) genutzt werden.

An einer Teilnahme an einem Forschungsprogramm zu dieser Thematik wären wir sehr interessiert.

Erste Gespräche zu dieser Thematik haben wir bereits mit

- dem Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Technologie in Düsseldorf, Herrn Dr. Pelzer, und
 - der Fa. O-Flexx in Duisburg
- geführt.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Omnical Kessel- und Apparatebau GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Hauptstraße 156, 35716 Dietzhölztal

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Heribert Fasel / 02774 – 81 -101 / h.fasel@omnical.de / www.omnical.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Keine.

Umfangreiche Literaturrecherchen zu Thematik, Kontakt zu Instituten, Netzwerk zu KMU, welcher an ähnlichen Lösungen interessiert sind.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Stationäre Wärme-Kraftanlagen sind nicht in der Lage Exergie vollständig umzuwandeln. Sowohl latente Wärmen welche in die Umgebung abgeleitet werden, als auch nicht vermeidbare Verluste auf höherem Temperaturniveau stellen potenzielle Anwendungen dar. Innerhalb der energetischen Bilanzgrenzen wird elektrische Energie zugeführt, welche durch thermoelektrische Generatoren substituiert werden kann.

Beispiele:

Verbrennungsluftgebläse, (schlecht isolierte) Umwälzpumpen bei 100 °C, usw.

Nutzbare Temperaturen auf den stationären Maschinen bei ca. 400 °C welche nicht besser isoliert werden können.

Der größte Nutzbare Effekt ist bei solchen Anlagen am kalten Ende zu erreichen, wo fehlende Wärmesenken dazu führen, dass riesige Mengen an Energie ungenutzt abgegeben werden müssen.

Beispiel : Bei einer Kesselanlage mit 10 MW Leistung und einem Wirkungsgrad von 95 %, bezogen auf H_u , sind dies 500 kW Abwärme im Rauchgas bei 120 °C, welche nicht genutzt werden können da keine weitere Wärmesenke verfügbar ist.

In Deutschland werden jährlich ca. 1500 solcher Anlagen neu installiert !

Vordringlich ist daher die Thermovoltaike auf niedrigem Temperaturniveau.

Frage:

Derzeit sind verschiedene KMU mit diesen Themen beschäftigt, mit dem Ziel entsprechende Patente für Ihre Firmen abzuleiten.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Seissenschmidt AG, Innovationsmanagement

Adresse der Organisationseinheit: Daimlerstraße 11, 58840 Plettenberg

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Michael Rösemann / 02391-9151014 / m.roesemann@seissenschmidt.com / www.seissenschmidt.com

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Als Lieferant von warm umgeformten Komponenten für die Automobilindustrie sind wir grundsätzlich bestrebt, die vergleichsweise hohen Stromkosten zur Erzeugung von Wärmeenergie auf ein möglichst niedriges Niveau zu bringen. U.a. sind wir hierzu über eine Förderinitiative des Landes Nordrhein-Westfalens bzw. der EU (EFRE) in eine Kooperation mit dem Industrieverband Massivumformung e.V. (IMU), der FH-Südwestfalen (Labor für Massivumformung), FH-Düsseldorf und der O-Flexx Technologies GmbH getreten, um nach praxistauglichen Lösungen zur Nutzung von ungenutzter Wärmeenergie zu suchen. Das Labor für Massivumformung unter Leitung von Prof. Dr. Herbertz konnte hierzu bereits in voran gegangenen Projekten Erfahrungen sammeln und übernimmt für dieses Projekt die Projektleitung. Bei diesem Projekt sollen die thermoelektrischen Generatoren in Verbindung mit einem Isothermtransformator als Stromerzeuger im Vordergrund stehen. Die Firma Seissenschmidt AG stellt im Wesentlichen die Produktionsanlagen für die Testphase zur Verfügung.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Es sind zu dem Thema noch keine Lösungen bei uns in der Firma etabliert worden. Die Absicht des o.g. Forschungsvorhabens zielt zunächst auf den Bau eines Demonstrators ab, mit dem die Praxistauglichkeit geprüft werden soll.

Das Labor für Massivumformung hat bei uns stichprobenartig Temperaturaufnahmen durchgeführt und über die spezifischen Bauteilinformationen die Wärmeflüsse errechnet. Die genauen Daten können Sie gerne beim Labor für Massivumformung einholen.

Frage: Falls ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden sollte: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Da wir bereits an dem Thema arbeiten ist für uns momentan kein Bedarf absehbar, sich an zusätzlichen Studien zu beteiligen.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Vaillant GmbH, Group Innovation Technology Scouting IRI-T

Adresse der Organisationseinheit: Berghauser Straße 40, 42859 Remscheid

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Thomas Badenhop / 02191/18-2242 / Thomas.Badenhop@vaillant.de / www.vaillant.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Familienunternehmen
(Nicht KMU im Sinne der EU oder AiF Definition)

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Vaillant bietet seinen Kunden weltweit umweltfreundliche und energiesparenden Heiz- und Lüftungssysteme an, die verstärkt regenerative Energien nutzen. Das Produktportfolio umfasst Solarthermie- und Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen, Pelletkessel, Lüftungsgeräte für Niedrigenergiehäuser, Kraft-Wärme-Koppelungsanlagen für 1 bis 20 kW elektrische Leistung, hocheffiziente Heizsysteme auf Basis fossiler Energieträger sowie intelligente Regelungen.

Die exergetische Nutzung der Abwärme von Heizgeräten und Kraft-Wärmekopplungsanlagen mittels thermo-elektrischen Generatoren ist eine Möglichkeit die Energieeffizienz fossiler Systeme zu steigern. Im Rahmen der Technologieentwicklung betrachtet Vaillant verschiedene Stoffsysteme, wie z.B. oxydische thermo-elektrisch aktive Verbindungen. Des Weiteren versucht Vaillant die Anforderungen an TEG für den Einsatz in der Hausenergieversorgung zu definieren und mit potentiellen TEG Projektpartner und Lieferanten zu diskutieren sowie Technologievorhaben und Forschungsbedürfe zu beschreiben und zu entwickeln.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Vaillant möchte Versuchsträger bauen und im Gerätekontext untersuchen und plant Untersuchungen für das Jahr 2014. Im Fokus bei Vaillant sind derzeit zwei Anwendungsfälle: Zum einen die exgergetische Abwärmenutzung von KWK- und Heizgeräten sowie zum anderen die autarke Energieversorgung von Sensoren und Aktoren in der Hausenergieversorgung. Dementsprechend sind Temperaturniveaus und Wärmeflüsse sehr verschieden.

Frage: Falls ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden sollte: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Antwort: Vaillant befindet sich in einer Phase der Definition und Entwicklung von Technologievorhaben im Bereich Thermo-Elektrik. Vaillant ist daher daran interessiert mit starken Partnern das Thema Thermo-Elektrik in der Hausenergieversorgung voran zu treiben sowie Technologieprojekte in europäische, nationale oder nordrhein-westfälische Förderprogramme einzubinden.

Der Einsatz der Thermo-Elektrik in der Hausenergieversorgung zeigt erhebliche

technologische Herausforderungen auf, welche einen signifikanten Forschungsbedarf nach sich ziehen wird. Gerade

Fragestellungen zur systemtechnischen Einbindung von TEG-Modulen beispielsweise in Wärmeübertrager von Heizgeräten sind wenig bis gar nicht bisher untersucht. Hier besteht großer Entwicklungs- und Forschungsbedarf. Ein NRW Forschungsprogramm sollte daher Aspekte der Systemintegration unbedingt umfassen und der Geräteindustrie, die nicht kmU Betriebe sind, Förderungsmöglichkeiten bieten, um Technologieentwicklung in diesem Bereich betreiben zu können. Typischerweise wird die Industrialisierung von Technologien dort umgesetzt, wo selbige entwickelt wurde. Produkte, welche einer solchen NRW Technologieförderung entstammen, werden später mit dazu beitragen, Arbeitsplätze am Standort NRW zu sichern.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: WZR ceramic solutions GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Lise-Meitner-Straße 1, 53359 Rheinbach

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr. Dieter Nikolay / 02226 169814 / d.nikolay@wzr.cc / www.wzr.cc

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Die IHK Bonn hatte im Rahmen einer Task Force das Thema vorgestellt und zu einigen Sitzungen eingeladen. WZR war als teilnehmendes Unternehmen an der Task Force beteiligt.

Darüber hinausgehende Aktivitäten in diesem Bereich bestehen nicht.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Auf Basis der Task Force soll ein Demonstrator aufgebaut werden, mit Hilfe dessen die Energiegewinnung an einer realen Wärmequelle (elektrisch beheizter Ofen) nachvollzogen werden kann.

Steckbriefe Forschung

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dipl.-Ing. B. Stranzinger / 0211 6707366 / bernhart.stranzinger@bfi.de / www.bfi.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Forschungsinstitut

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Die Abteilung „Gastechnik und Energiewirtschaft“ arbeitet u. a. mit Unternehmen der „Eisen- und Stahlindustrie“ und Herstellern von thermoelektrischen Generatoren an verschiedenen Projekten zur Abwärmenutzung mittels TEG. Dabei steht nicht die Entwicklung neuer Werkstoffe für TEG im Vordergrund, sondern die industrielle Anwendung von TEG zur Abwärmenutzung.

An den Thermoprozessanlagen der Eisen- und Stahlindustrie fallen Abwärmeströme verschiedener Temperaturniveaus an. Neben der Abgaswärme von Feuerungsanlagen fällt auch Strahlungsabwärme z. B. an Stranggießanlagen oder in Warmwalzwerken an. So ist das Hauptziel eines Projektes die Strahlungsabwärme mit einer Temperatur von bis zu 900°C (z. B. Brammen oder Sinter) mittels TEG zu nutzen. Zur Erreichung der Ziele wird hierfür ein kompaktes, robustes und wirtschaftliches Großmodul zur dezentralen Erzeugung von Strom aus Abwärme mit Hilfe von TEG entwickelt und im Technikum sowie industriellen Umfeld (Hüttenwerk) getestet.

Ein weiteres Projekt beinhaltet die technisch-wirtschaftliche Untersuchung der Abwärmeverstromung im Niedertemperaturbereich (< 150 °C) mittels TEG. Es wird sowohl ein System entwickelt für labortechnische Untersuchungen als auch für den Prozesseinsatz bei den industriellen Partnern des Forschungsprojekts.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Haupteinsatzgebiet von TEG ist für die Eisen- und Stahlindustrie die Nutzung von Abwärmeströmen, die bislang zumeist nicht wirtschaftlich genutzt werden können (z. B. Strahlungsabwärme, verschmutzte Abgasströme). Hauptvorteil ist der einfache Aufbau im Gegensatz zu etablierten Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme, wie z. B. ORC, Dampfturbine usw. und der nahezu wartungsfreie Betrieb. Zudem können TEG auch besser zur Nutzung stark diskontinuierlicher Abwärmeströme genutzt werden als herkömmliche Verfahren. Dabei stehen vor allem die Nutzung von Strahlungsabwärme (mit Temperaturen der Strahlungsquelle von bis zu 900°C) und die Nutzung von Abgasströmen von bis zu 650°C im Vordergrund.

(für Industriepartner: Hier wären besonders die zu erwartenden Temperaturen und

Wärmeflüsse sowie die Art der Verwendung für eine mögliche Anwendung von Thermoelektrik in Ihrem Unternehmen von Interesse)

Frage: Sollte ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Da das BFI in der Nutzung von TEG zur Abwärmeverstromung im großindustriellen Umfeld ein großes bislang ungenutztes Potential sieht, wie z. B. Einsatz im Hochtemperaturbereich, Betrieb von Großmodulen usw. ist ein Forschungsprogramm für TEG aus unserer Sicht nahezu unerlässlich. Viele Fragestellungen zur praktischen Nutzung sind noch ungeklärt.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: DLR, Institut für Werkstoff-Forschung

Adresse der Organisationseinheit: Linder Höhe, 51145 Köln

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Prof. Dr. E. Müller / 02203-6013556 / eckhard.mueller@dlr.de / www.dlr.de/wf

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Forschungsinstitut

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Eine sprunghaft steigende Nachfrage industrieller Anwender nach Systemlösungen und Entwicklungssupport sowie die Einrichtung starker Förderprogramme (DFG, BMBF) zum Schwerpunkt Thermoelektrik haben im Institut für Werkstoff-Forschung zu einer raschen Zunahme der Projektkooperationen geführt. Die thematischen Arbeiten Abteilung „Thermoelektrische Materialien und Systeme“ überstreichen einen breiten Bereich der Wertschöpfungskette. Basierend auf der Materialentwicklung zu mehreren anwendungsrelevanten Substanzklassen und der kontinuumstheoretisch fundierten Modellierung von segmentierten und gradierten thermoelektrischen (TE) Elementen und Devices sowie unterstützt durch den Aufbau vielfältiger unikalier TE Charakterisierungsmethoden für Materialien und Wandlermodule werden Systementwicklungen thermoelektrischer Generatoren (TEG) und Sensoren für den Hochtemperatureinsatz verfolgt.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Im Rahmen von Forschungsprojekten und zur Veranschaulichung thermoelektrischer Effekte sind eine Reihe von Demonstratoren aufgebaut worden, die z.B. durch Nutzung der Wärme des menschlichen Körpers oder einer Standheizung die generierte elektrische Energie zur Anwendung bringen.

(für Industriepartner: Hier wären besonders die zu erwartenden Temperaturen und Wärmeflüsse sowie die Art der Verwendung für eine mögliche Anwendung von Thermoelektrik in Ihrem Unternehmen von Interesse)

Frage: Falls ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden sollte: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Fachhochschule Düsseldorf

Adresse der Organisationseinheit: Universitätsstr.1, 40225 Düsseldorf

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr. Dirk G. Ebling / 0211-81-14981 / dirk.ebling@fh-duesseldorf.de / www.fh-duesseldorf.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Fachhochschule

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Die Fachhochschule Düsseldorf beschäftigt sich in ihren Fachbereichen Elektrotechnik sowie Maschinenbau und Verfahrenstechnik mit der effektiven Nutzung von Wärme in einer Vielzahl sehr unterschiedlicher Anwendungsprojekte. Die Anwendungsvarianten erstrecken sich hierbei von BHKW's oder der Nutzung von Solarthermie zur Wärme-/Kälteversorgung bis hin zur Berechnung von effizienten Turbinenschaufeln in Verbrennungsprozessen.

Es besteht langjähriges Know-how auf den Gebieten des Wärmemanagements und der Wärmenutzung in größeren Systemen sowie der Kopplung von thermischen Systemen an größere Prozesse sowie der Simulation von thermischen Prozessen verschiedener Ausprägung. Darüber hinaus besteht große Erfahrung in der effizienten Einspeisung und im Management von elektrischer Energie in bestehende Versorgungsnetze.

Im Bereich der Thermoelektrik gibt es fundiertes Wissen und Erfahrungen in der gesamten Breite der Thermoelektrik, angefangen mit der Materialentwicklung über den Bauelementaufbau bis hin zur Systemintegration, wodurch die Thermoelektrik in ihrer gesamten Breite in Lehre und Forschung darstellbar ist.

Die Thermoelektrik wurde zunächst im Themenfeld der Energierückgewinnung im Bereich der Massivumformung mit ihren ca. 250 weitgehend in NRW ansässigen und meist mittelständischen Unternehmen aufgesetzt. Prozessbedingt muss der Stahl für die Verarbeitung auf ca. 1200 – 1300 °C erwärmt werden. Die Prozessenergie wird heute ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Nachfolgend einige Branchenkennzahlen (Quelle: Industrieverband Massivumformung):

- Tonnage: 3 Mio. Tonnen pro Jahr
- Anzahl Mitarbeiter: 31.000

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird ein Energiewandler konzipiert, entwickelt, als Demonstrator gebaut, im industriellen Umfeld getestet und bewertet.

In weiteren Vorhaben werden Thermogeneratoren zum Einsatz am menschlichen Körper zur Versorgung von medizinischen Unterstützungssystemen in Zusammenarbeit mit der Uni-Klinik in Düsseldorf entwickelt.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Im Rahmen von aktuellen Forschungsprojekten werden Prototypen zur Nutzung von Abwärme durch thermoelektrischer Effekte aufgebaut. So soll z.B. die Nutzung der Wärme von Metallumformprozessen oder des menschlichen Körpers zur Erzeugung von elektrischer Energie entweder zur Einspeisung in Versorgungsnetze oder aber zur energieautarken Versorgung von medizinischen Unterstützungssystemen ermöglicht werden.

(für Industriepartner: Hier wären besonders die zu erwartenden Temperaturen und Wärmeflüsse sowie die Art der Verwendung für eine mögliche Anwendung von Thermoelektrik in Ihrem Unternehmen von Interesse)

Frage: Sollte ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Ein NRW-Forschungsprogramm im Bereich Thermoelektrik könnte im besonderen Maße die Konkurrenzfähigkeit des Landes auf diesem jungen Arbeitsgebiet erheblich verstärken. Neben der Förderung durch das BMBF mit dem Programm Thermopower gibt es auch eine Reihe regionaler und EU-weiter Förderungen, die sich vor allem mit der Material- und Bauelemententwicklung und Anwendungen z.B. im Automobilbereich adressieren. Eine gezielte Förderung z.B. im Bereich stationärer Anwendungen und Systementwicklungen, könnte für das Land neue Ressourcen erschließen.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Fachhochschule Südwestfalen, Labor für Massivumformung

Adresse der Organisationseinheit: Frauenstuhlweg 31, 58644 Iserlohn

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Prof. Dr.-Ing. Rainer Herbertz / 02371 566-199 / herbertz.rainer@fh-swf.de / www.fh-swf.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Fachhochschule

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

In der Branche Massivumformindustrie werden in Deutschland jährlich über 1000 GWh/a Energie für die Materialerwärmung eingesetzt. Diese Energiemenge wird heute größtenteils ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

In dem von der DBU geförderten Projekt „Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung“ wurden verschiedene Ansätze zur Energieeinsparung und –rückgewinnung untersucht. Ein Arbeitspunkt befasste sich auch mit der Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie. Für thermoelektrische Generatoren wurde in diesem Zusammenhang eine Potentialabschätzung durchgeführt. Im Ergebnis konnte festgehalten werden, dass die Technologie prinzipiell für die Massivumformung interessant ist aber zum Zeitpunkt der Untersuchung ein wirtschaftlicher Einsatz nicht gegeben war. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Kennlinie eines TEG bezüglich Temperaturniveau und Temperaturstreuung nicht zu den typischen Bedingungen in einem Umformprozess passen. Daher sind TEG für einen Umformprozess zunächst ungeeignet. Zusätzliche Entwicklungen, die für eine homogene Temperatur sorgen (Isotherm-Transformator), könnten diese Problematik allerdings beseitigen.

Aus dieser Erkenntnis heraus wurde das Projekt „Entwicklung eines Energiewandlers zur Rückgewinnung von Prozessenergie in der Massivumformung auf Basis thermoelektrischer Generatoren“ (ENERTEG) initiiert, das sich z.Z. in der Bearbeitung befindet. Im Rahmen des beantragten Vorhabens soll ein Energiewandler konzipiert, entwickelt, als Demonstrator gebaut, im industriellen Umfeld getestet und bewertet werden, mit dem die hohe Prozessenergie bei Massivumformprozessen mit möglichst hohem Wirkungsgrad in elektrischen Strom umgewandelt und dann als hochwertiger Energieträger beliebig weitergenutzt werden kann.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Im Rahmen des Forschungsprojekts ENERTEG soll ein Demonstrator entwickelt und gebaut werden, der an einem Transportband die abgegebene Wärme aufnimmt, das Temperaturniveau homogenisiert und mittels thermoelektrischer Generatoren in elektrischen Strom umwandelt. Die auf dem Transportband abkühlenden Bauteile haben am Anfang des Bandes Temperaturen zwischen 846°C und 1124°C (je nach gefertigtem Artikel), was einer für die weitere Verwendung „nutzbaren“ Wärmestromdichte von 11-58

kW/m^2 entspricht. Am Ende des Transportbandes liegen die Bauteiltemperaturen noch zwischen 545°C und 859°C . Dies entspricht einer „nutzbaren“ Wärmestromdichte von 4 bis 24 kW/m^2 .

Frage: Falls ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden sollte: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Antwort: Aus unserer Sicht wäre die Auflegung eines Förderprogramms mit dem Schwerpunktthema TEG sinnvoll, wenn gezielt an industriellen Anwendung und deren wirtschaftlicher und technischer Optimierung geforscht wird.

Das o.g. Projekt ENERTEG wird bereits gemeinsam mit Projektpartnern aus Industrie und Wissenschaft bearbeitet.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Forschungszentrum Jülich GmbH, JCNS-2

Adresse der Organisationseinheit: Leo Brand Str. 1, 52425 Jülich

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

R. Hermann, Prof. Dr. / 02461-614786 / r.hermann@fz-juelich.de / www.fz-juelich.de/jcns

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Forschungsinstitut

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Mittels der Einrichtung einer Helmholtz Nachwuchsgruppe, und verschiedener Förderprogramme (DFG SPP-1386, BMBF WInG) wurde im Jülich Centre for Neutron Science das Thema der Thermoelektrik, insbesondere der Gitterdynamischen Aspekte in verschiedenen Kooperationen untersucht.

Die Forschung ist hauptsächlich auf fortgeschrittenen Methoden zur Charakterisierung von Struktur und Dynamik ausgelegt, wobei die Synthese der Materialien von Projektpartnern durchgeführt wird. Phononenspektroskopie, Synchrotronstrahlung- und Neutronenbeugung, sowie Mössbauer- und Ultraschallspektroskopie und spezifische Wärme Messungen bilden das Gerüst der Methoden mit denen die mikroskopischen Mechanismen der Wärmeleitung untersucht werden. Als Materialklassen sind prominent Telluride und Antimonide untersucht worden, sowohl in Bulk- als auch verschiedenen nanostrukturierten Formen.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Es wird nicht direkt an Anwendungen gearbeitet, wobei Peltierelemente als Probenumgebung zur thermischen Regulierung eingesetzt wurden. Ein möglicher Anwendungsbereich am FZ Jülich im breiteren Sinne könnte Brennstoffzellen betreffen, die bedarf allerdings einer detaillierten Sondierung.

Frage: Sollte ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Ja. Es gibt privilegierte Kooperationen mit dem DLR Köln (Prof. E. Müller), mit der Universität Duisburg-Essen (Dr. G. Schierning), und mit der RWTH Aachen (Prof. M. Wuttig), und außerhalb NRW mit dem Fraunhofer IPM in Freiburg (Dr. J. König) und der Universität Hamburg (Prof. K. Nielsch). Interesse besteht auch mit der FH Düsseldorf in Zukunft zu kooperieren (Prof. D. Ebling).

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: iet, Institut für Energie Transformation, gUG
(haftungsbeschränkt)

Adresse der Organisationseinheit: Erzberger Straße 14, 47533 Kleve

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Prof. Dr. G. Bastian / 02821-5908744 / info@energietransformation.org
www.energietransformation.org

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Forschungsinstitut

Bisherige Arbeiten / Know-how und Anwendungen auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Das iet wurde 2013 aus der Hochschule Rhein-Waal heraus gegründet mit dem Ziel, Forschungserkenntnisse in Anwendungen zu überführen, speziell auf dem Gebiet der erneuerbaren Energietechnik. Als gemeinnütziges Unternehmen werden Forschungsvorhaben durchgeführt, Firmen und Privatpersonen beraten und Nachwuchswissenschaftler gefördert.

Vorarbeiten bei der Anwendung der Thermoelektrik lagen bei der Wärmekonversion aus Industrieprozessen (Projekt PAWELS), Beleuchtung (Projekt LED-Heat), Automobil (Projekt EcoTEG) Solarthermie (studentische Arbeiten und laufende Anträge), Brennstoffzellen (studentische Arbeiten), Wärmespeichern (studentische Arbeiten) sowie KWK (laufende Anträge).

Zur Messtechnik und Charakterisierung existieren diverse Vorarbeiten, Veröffentlichungen und intensive Industriekontakte (Toshiba, Kyocera, O-Flexx).

Zur Materialentwicklung und Grundlagenforschung laufen aktuell DFG-geförderte Projekte.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Fachgebiet Nanostrukturtechnik

Adresse der Organisationseinheit: Bismarckstraße 81, 47057 Duisburg

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Prof. Dr. R. Schmechel / 0203-379-3347 / roland.schmechel@uni-due.de / <http://www.uni-due.de/nst/>

Dr. Gabi Schierning / . 0203-379-3296 / Gabi.Schierning@uni-due.de / <http://www.uni-due.de/nst/>

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Universität

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Im Jahr 2009 wurde am Lehrstuhl für *Nanostrukturtechnik* eine NRW-Nachwuchsgruppe um Frau Dr. Gabi Schierning zum Thema *Thermoelektrik* ins Leben gerufen. Seit dem sind mehrere Projekte finanziert durch die DFG, AiF, ZIM und Stiftung Mercator angelaufen, bzw. durchgeführt worden. Die Arbeiten umfassen die Verdichtung von nanopartikulären Ausgangsmaterialien zu nanostrukturierten Volumenkörpern, überwiegend durch Stromintern (CAPAD), die thermoelektrische Charakterisierung der Bulk-Materialien und der Aufbau einfacher Testgeneratoren aus diesen Materialien sowie deren thermoelektrische Charakterisierung. Die bisher untersuchten Materialsysteme sind nanokristallines Silizium und nanokristalline Silizium/Germanium Legierungen, sowie nanokristallines ZnO mit jeweils unterschiedlichen Dotierungen, überwiegend für den Einsatz in der Hochtemperaturthermoelektrik sowie Sb_2Te_3 für den Einsatz im Niedertemperaturbereich. Aus einigen ausgewählten Thermoelektrika wurden auch Testgeneratoren gefertigt. So wurde der erste auf Nano-Silizium basierende thermoelektrische Generator mit dem *InnoMateria-Award 2012* ausgezeichnet. Die Arbeiten erfolgen oftmals in enger Kooperation mit anderen Abteilungen/Fakultäten, wie der Chemie oder der Verfahrenstechnik zur Bereitstellung der Materialien und der Theoretischen Physik für die Simulation von Transportvorgängen aber auch externen Instituten oder anderen Universitäten.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Mit einer Konzentration auf überwiegend nachhaltige Materialien soll eine Öffnung für Massenmärkte möglich werden. Die bisher verwendeten Materialien eignen sich vorrangig für den Hochtemperaturbereich, also z.B. zur Energiewandlung in Verbindung mit Verbrennungsprozessen, z.B. zur autarken Energieversorgung von Sensoren oder kleinen Bordsystemen. Entwicklungen von Materialien für niedrigere Temperaturen wären aber nicht ausgeschlossen.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: Universität Paderborn, Fachgebiet Sensorik

Adresse der Organisationseinheit: Warburger Str. 100, 33098 Paderborn

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hilleringmann / 05251-602225 / hilleringmann@sensorik.upb.de /
<http://sensorik.upb.de> <http://www.dlr.de/wf>

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): Universität

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Im Rahmen eines BMBF-Projektes werden hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren mit Titandisilizidverdrahtung hergestellt und analysiert. Die selbst hergestellten Demonstratoren nutzen Silizium-Germanium oder Eisendisilizid als Thermoschenkel, die in einem neu entwickelten Messstand bei Temperaturen von bis zu 750°C analysiert werden. Per Simulation werden die thermoelektrischen Materialien hinsichtlich ihrer Geometrie an die Abwärmequelle optimal angepasst, um einen möglichst hohen Wärmefluss zu erzielen.

Die vorhandene Ausstattung ermöglicht sowohl die Sinterung neuer Materialsysteme als auch das genaue Zuschneiden und Polieren der gesinterten Materialien zu Thermoschenkeln, die dann per Silizidverdrahtung zu Generatoren verschaltet werden.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Im Rahmen von Forschungsprojekten werden die Generatoren im Abgassystemen von Kraftfahrzeugen eingesetzt. Weitere Anwendungen sind in der Abwärmenutzung thermischer Prozesse in der Industrie zu sehen, z. B. bei der Herstellung von Ruß für die Reifenindustrie, bei der Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades in Blockheizkraftwerken sowie der Nutzung von Abwärme in der chemischen Industrie. *(für Industriepartner: Hier wären besonders die zu erwartenden Temperaturen und Wärmeflüsse sowie die Art der Verwendung für eine mögliche Anwendung von Thermoelektrik in Ihrem Unternehmen von Interesse)*

Frage: Sollte ein NRW-Forschungsprogramm für TEG aufgelegt werden: Gibt es bereits bestehende Kooperationen oder Partner aus Forschung und Industrie, die für Sie von besonderem Interesse in einer solchen Kooperation wären?

Fa. Degussa (Abwärmenutzung)

Benteler AG

Verschiedene Hersteller von Blockheizkraftwerken (Wirkungsgraderhöhung, großteils nicht NRW)

Steckbriefe Herstellung/Vertrieb

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: O-Flexx Technologies

Adresse der Organisationseinheit: Auf der Höhe 49, 47059 Duisburg

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr. H. Ulland / 0203-3635 612 0 / h.ulland@o-flexx.com / www.o-flexx.com

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Gegründet im Januar 2006 verfolgte O-Flexx im Laufe seiner gesamten Firmenhistorie das Ziel, thermoelektrische Komponenten, Module und Systeme zu entwickeln, die sich in mehreren Faktoren von den bekannten Bulk-Modulen unterscheiden:

Erreichung einer gesteigerten Effizienz durch:

- Nanostrukturierte Materialien (im Herstellungsprozeß)
- In-plane Wärmefluß
- Materialschlüssige Verbindung zwischen Modul und Heiß- bzw. Kaltseite
- Nutzung von pn-Übergängen

Optimierte Kostenstruktur durch:

- Niedrigen Materialverbrauch durch thermoelektrische Dünnschichten
- Etablierung eines hochvolumigen Fertigungskonzepts

Flexible Anpassung auf Kundenanforderungen durch:

- Thermische und elektrische Flexibilität
-

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

Entwickler, Produzent und Vermarkter von innovativen und neuartigen thermoelektrischen Modulen und Subsystemen, die sowohl auf der Energieerzeugungsseite (von mW bis kW) als auch auf der mittel- und großflächigen Kühlungsseite, eingesetzt werden können.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: QUICK OHM Küpper & Co. GmbH

Adresse der Organisationseinheit: Unterdahl 24 b, 42349 Wuppertal

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Stefan Koch / 0202/404327 / koch@quick-ohm.de / www.quick-ohm.de

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

QUICK OHM hat bereits vor mehr als 10 Jahren den zukünftigen hohen Stellenwert der Thermoelektrik für die Industrie festgestellt und entwickelt seit dieser Zeit Systeme und Komponenten für breit gefächerte Industrieanwendungen. QUICK OHM ist einer der größten Händler und Anwendungsberater für Thermoelektrische Bauteile und deren Anwendungen. In den letzten Jahren werden seitens QUICK OHM verstärkt Fragen rund um die Thermogeneratorik diskutiert und der Industrie angeboten. Gleichzeitig war und ist QUICK OHM in nationalen und internationalen Forschungsprojekten involviert.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

QUICK OHM hat weit über 1.000 Projekte in der Industrie bearbeitet und mit thermoelektrischen Lösungen beliefert. Im Rahmen von Forschungsprojekten und zur Veranschaulichung thermoelektrischer Effekte sind eine Reihe von Demonstratoren aufgebaut worden.

Aktuell laufende Forschungsvorhaben sind „ThermoSpritz“ – Thermisches Spritzen zur industriellen Herstellung von TEG-Modulen (FKZ: 03X3554E und „NanoCaTe“ – Nono-Carbons for versatile power supply modules.

Kurzbeschreibung des Unternehmens

Name der Organisationseinheit: RGS Development B.V.

Adresse der Organisationseinheit: Bijlestaal 54A, 1721 PW Broek op Langedijk, Niederlande

Kontaktperson / Telefon / email / Internet:

Dr. A. Schönecker (CTO) / +31-226-332951 / schonecker@rgsdevelopment.nl /
www.rgsdevelopment.nl

Art der Organisationseinheit (KMU / Universität / Forschungsinstitut): KMU

Bisherige Arbeiten / Know-how auf dem Gebiet Thermoelektrik:

Das Geschäftsfeld von RGS Development liegt in der Entwicklung, Fertigung und Produktion von Halbleitermaterialien und Silizium Legierungen mittels des patentierten „ribbon-growth-on-substrate“ Prozess. Dabei werden die Materialkomponenten aus der Flüssigphase mittels schneller Abkühlung auf einem Substrat mit der gewünschten Zusammensetzung direkt in Form gegossen. Hierdurch können neue Hochtechnologiematerialien sehr kostengünstig im industriellen Maßstab hergestellt werden. RGS Development verwendet diese Technologie zur Herstellung von thermoelektrischen Elementen und darauf basierten Modulen auf der Basis von MnSi. Diese Module sind für die Anwendung im industriellen Hochtemperaturbereich entwickelt. Die thermoelektrischen Module bauen auf einem kundespezifischen Design auf, wobei sowohl Materialtechnologie als auch die Erfahrung von RGS Development in Hochtemperaturtechnologie und Ofenbau einfließen.

Etablierte und/oder mögliche Anwendungen der Thermogeneratorik:

RGS Development richtet sich auf Anwendungen in der Industrie bei denen Restwärme im Temperaturbereich über 800°C anfällt. Beispiele dafür sind Walzstraßen oder Ofenisolationen in der Stahl- und Glasindustrie. Dies sind Gebiete in denen heute ein großes Wärmepotential nicht genutzt wird. Durch den hohen Temperaturgradient und die günstige Kostenstruktur der RGS TEG Systeme amortisieren sich Investitionen oft innerhalb von 3 Jahren.

Frage: In Verband mit einem möglichen Forschungsprogramm in NRW wäre eine Zusammenarbeit mit Forschungspartnern (DLR, Universität Duisburg) zur Materialcharakterisierung sehr sinnvoll. Auf der Anwenderseite sucht RGS Development die Zusammenarbeit mit Partnern aus der Schwerindustrie, um das Zusammenspiel zwischen TEG System und (Stahl-)Produktionsprozess zu definieren und kosteneffiziente Lösungen zu entwickeln. Dabei kann RGS Development sowohl in der Pilot- als auch in der kommerziellen Einführungsphase ein zuverlässiger Partner sein.